

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Universitaire d'Ain Témouchent BELHADJ Bouchaib

جامعة عين تموشنت



Faculté des Sciences et Technologies

Département de Génie Civil et Travaux publics

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Travaux Public

Spécialité : Voie et Ouvrages d'Art

Thème

Etude de formulation d'un béton pour chaussée rigide

Présenté Par :

Mr. MAHMOUDI SOUFIAN

Mr. MOUILAH BACHIR

Encadreur : Mr GUELIL Mustapha

Devant le jury composé de:

Président: Mr DJELIL MOHAMED

Examinatrice : Mme MAAROUF HAFIDA

Année universitaire 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّاتِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّاتِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّاتِ

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la Santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Je tiens à remercier spécialement l'encadreur **Mr Guellil Mustapha**, qui fut la première à me faire découvrir le sujet qui a guidé mon mémoire. Et donnez-moi tout le soutien et la recherche pour terminer ce travail.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères au corps professoral et administratif de l'Université Ain Témouchente, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Un grand merci à ma mère et mon père, pour leur amour, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel, à la fois moral et économique, qui m'a permis de réaliser les études que je voulais et par conséquent ce mémoire.

Je tiens à remercier **Mr Akkou Djamel** directeur de l'usine

De traverses bi- bloc à SBA Pour l'aide qu'il m'a apportée pour concilier mon travail et mes études.

Dédicace

A mes chers parents, pour tout leur sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien, tout au long més études que dieu les protège

A mes chers frères (NAIMI), (ABDELKADER), (DJAMEL) pour leur appui et leur encouragement

A més chrs seures (L) ,(F), pour leur ecouragement permanantes, et leur soutien moral

Je tien a présenter més rconnaissance et remerciement à ma femme (ABD ELBARLN) qui n'a jamais

Secces de me soutenir pour que je puisse finir més études et surtout etre le meilleur et à qui je voudrais exprimer mes affection pour sont courage et pacience que dieu la protège.

A tout ma famille pour leur soutien tout au long de parcoure universitaire

A mes belle petites filles (assinet) et (ferdaousse)

A mes amis de parcours universitaires et mes amis fe la vie

Et spécialement amis antime chaibi abd elmalek.

Mahmoudi soufian



Dédicace

*Comme tout à une fin, voilà enfin terminus études universitaires.
Je remercie mon ALLAH, de m'avoir donné le courage et la patience
pour aller jusqu'au bout du parcours des études ce présent travail.*

Je dédie Ce modeste travail

*A ma grand famille, Mon père et ma mère, mes frère et sœurs.
A ma petite famille, ma femme, mes enfants, kawtar, mohamed, et le
petit chikhe.*

Atout mes amis.

Atout mes professeurs de département de génie civil.

Spécialement mon encadreur Mr : MUSTAPHA GUELLIL.

A tous les étudiants de la promotion 2020/2021.

BACHIR MOUILAH

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la formulation d'un béton compacté au rouleau (BCR) pour un emploi en technique routière en utilisant des matériaux locaux. La formulation de notre BCR a été réalisée en se basant sur la méthode de Fuller Thompson. Pour valider notre formulation, différents essais de caractérisations à l'état frais et à l'état durcis ont été menés au laboratoire.

Mots clés :

Bétons Compactés Au Rouleau, Fuller Thompson, technique routière, Caractérisation.

Abstract:

The objective of this dissertation is to study the formulation of roller compacted concrete (BCR) for use in road engineering using local materials. The formulation of our BCR was performed based on Talbot-Fuller-Thompson's method. To validate our formulation, various characterization tests in the fresh state and in the hardened state were carried out in the laboratory.

Keywords:

Roller Compacted Concrete, Talbot- Fuller- Thompson, Road Engineering, Characterization.

المخلص

الهدف من هذا البحث هو دراسة تركيب الخرسانة المضغوطة (BCR) لاستخدامها في هندسة الطرق باستخدام المواد المحلية. تم إجراء خليط BCR الخاصة بنا بناءً على طريقة Fuller –Thompson. Talbot للتحقق من صحة الخليط ، تم إجراء العديد من اختبارات التوصيف في الحالة الجديدة وفي الحالة الصلبة في المختبر.

الكلمات الرئيسية

الخرسانة المضغوطة، طومسون فولير، هندسة الطريق، التوصيف.

Sommaire :

Remerciement

Dédicace

Résumé

Introduction générale

Chapitre I généralité sur la chaussé rigide

Introduction générale	01
I introduction	03
I.2.1 Historique de la route en Algérie	03
I.3. Les chaussées rigides	05
I.4 Les différents types de chaussées en béton	06
I.4.1 Les dalles courtes en béton non armé	06
I.4.2 Les dalles courts goujonnées	06
I.5. La technique du béton armé continu (B.A.C)	07
I.6 Propriétés mécaniques générales	08
I.6.1 Prise et durcissement	08
I.6.2 Résistance à la compression et à la traction	08
I.6.3 Influence de la compacité	09
I.7 Comportement des chaussées rigides	10
I.7.1 Fonctionnement d'une chaussée en béton du type "dalles"	10
I.7.2 La mise en œuvre	12
I.7.2.1 Le répandage	12
I.7.2.2 La confection des joints de retrait – flexion	13
I.7.2.3 les traitements de surface	14
I.7.2.3.1 Le striage longitudinal à la toile de jute	14
I.7.2.4 Le striage transversal	14
I.7.2.5 Le cloutage	14
I.7.2.6 Le dénudage chimique	15
I.8 Les avantages et l'inconvénient	15
I.8.1 techniques	15
I.8.2 Les avantage	15
I.8.3 économiques	16

I.8.4 Les inconvénients	16
I.9 conclusion	16

Chapitre II généralité sur le BCR

II.1 Introduction.....	18
II.2. Le Béton Compacté au Rouleau (BCR).....	18
II.3. Historique	19
II.4. Les constituants	19
II.4.1. Le ciment	21
II.4.2. Les granulats	22
II.4.3. L'eau	22
II.4.4. Les fillers	23
II.4.4.1. Définition	23
II.4.4.2. Effets	23
II.4.4.3. Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes	24
II.4.4.4. Influence du filler sur l'état durci	25
II.5. Caractéristiques du BCR	26
II.6. Propriétés mécaniques et physiques du BCR	26
II.6.1 Résistance à la compression	26
II.6.2. Résistance à la traction	26
II.6.3. Résistance au cisaillement	27
II.6.4. Résistance à la flexion	27
II.7. Section de test du BCR	27
II.8. Préparation et mise en place du BCR	28
II.9. Cure du BCR	30
II.10. Applications du BCR en technique routière	30
II.11. BCR et béton conventionnel	31
II.12. Avantages et inconvénient du BCR	32
II.12.1. Avantages du BCR	32
II.12.2. Inconvénients du BCR	33

II.13. Méthodes de formulation	33
II.13.1. Méthode basée sur les limites de maniabilité	34
II.13.2. Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique	34
II.14. Compactage du BCR	36
II.14.1. Matériels de compactage	36
II.14.2. Opération de compactage	37
II 15. CONCLUSION	37

Chapitre III Caractéristique des matériaux

III.1 Introduction	39
III.2 Caractéristiques des matériaux	39
III.2.1 Eau de gâchage	39
III.2.2. les graviers	39
III.2.2.1 Analyse granulométrique selon la norme (NP EN 933-1)	40
III.2.2.2 Masse volumique réelle, masse volumique apparente et Coefficient	43
III.2.2.3 Porosité.....	44
III.2.2.4 Coefficient d'aplatissement selon la norme (NF EN 933-3)	44
III.2.2.5 L'essai Los Angeles sur gravier 8/15 selon la norme (NF P 18-573)	45
III.2.2.6 L'absorption	45
III.2.3 sable	46
III.2.3.1 Analyse granulométrique selon la (NP EN 933-1)	46
III.2.3.2 Module de finesse selon la norme (NF EN 13139)	48
III.2.3.2.1 Sable 0/1	48
III.2.3.2.2 Sable 0/3	49
III.2.3.3 Equivalent de sable selon la norme (NF P 18-598)	49
III.2.3.4 Masse volumique réelle, Masse volumique apparente	51
III.2.3.5 L'absorption	51
III.2.3.6 Essai de bleu de méthylène selon la norme (NA 1984)	52
III.2.4 Caractérisation du ciment Chamil CPJ – CEM II/B 32,5 N	52
III.2.4.1 Résistance à la compression	54
III.2.4.2 Résistance à la traction par fendage	55
III.2.5 Adjuvant	55

III.3 Essais caractéristiques sur BCR	56
III.3.1 Essai Proctor modifié	56
III.3.2 Le compactage manuel	56
III.3.3 Le compactage automatique	57
III.3.4 Le Vibro-compactage	57
III.4. conclusion	58

Chapitre IV : Formulation du BCR

Introduction	60
IV.1 Principes généraux	60
IV.2 choix de la méthode de formulation semi-empirique	61
IV. 3 Liant	62
IV.4 l'eau	63
IV.4.1 Évaluation de la quantité de ciment C et de la quantité d'eau E	63
IV.5 Les adjuvants	63
IV.6 les adjuvants réducteurs d'eau	63
IV.7 Calcul du volume des vides	64
IV.7.1 Choix de volume de pate	64
IV.8 Calcule des proportions	65
IV.8.1 Détermination du pourcentage de sable 0/1	65
IV.8.2 Détermination du pourcentage de sable 0/3	65
IV.8.3 Détermination du pourcentage de gravier 3/8	65
IV.8.4 Détermination du pourcentage de gravier 8/15	66
IV.8.5 Les proportions massiques retenues et le l'humidité sont regrouper sur le tableau	67
IV.8.6 Résultat de composition granulaire du BCR	67
IV.8.7 Composition du BCR sur le tableau suivant	68
IV.9 caractérisation du BCR par l'essai Proctor modifie	68
IV.9.1 courbe Proctor Modifié [20]	69
IV.10 Les essais d'écrasement (traction et compression) à 28 jours	70
IV.10.1 Résistance en compression	70
IV.10.2 Résistance en traction	70

IV.10.3 Confection des éprouvettes	70
IV.10.4 Résultats de résistance à la compression selon à la norme (EN 12390-4)	71
IV.10.5 Résultats de traction par fendage selon la norme (EN13390-6)	71
IV.11 Conclusion	71

Conclusion Générale.

Bibliographie.

Annexe.

Liste des Figure

Chapitre I : Généralités sur la chaussée rigide

Figure I-1 structure –type d'une chaussée a trafic $> 50 \text{ PL/j}$	04
Figure I-2 : structure –type d'une chaussée à trafic $\leq 50 \text{ PL/j}$	04
Figure I-3 : principe des dalle courtes, en béton non armé	05
Figure I-4 : joint transversal de retrait-flexion goujonné	06
Figure I-5 : principe du béton armé continu les armatures longitudinales	07
Figure I-6 : la résistance à la compression à la fonction du temps tend asymptotiquement	08
Figure I-7 : Schéma de principe d'une chaussée en béton traditionnelle.....	09
Figure I-8 : Fonctionnement d'une chaussée en béton.....	09
Figure I-9 : Fonctionnement d'une chaussée en béton.....	11

Chapitre II : Généralités sur le BCR

Figure II-1: Equipement du compactage du BCR.....	18
Figure II-2: Illustration de l'effet filler.	23
Figure II-3 Carottage des éprouvettes de BCR.....	27
Figure II-4 Carottage des éprouvettes cylindriques de BCR.....	27
Figure II-5 mise en place du BCR	29
Figure II-6: Cure du béton par arrosages ciblés.	29
Figure II-7 :Détermination du volume de pâte minimal(Gauthier & Marchand.2001).....	33
Figure II-8 : rouleaux compacteurs tandems à cylindres d'acier lisse	35
Figure II-9 rouleau pneumatique bomage :	35

Chapitre III : Caractéristique des matériaux

Figure III-1 : essai granulométrie des granulats	39
Figure III-2. Courbe granulométrique du sable (3/8) utilisé	40
Figure III-3: Courbe granulométrique du sable (8/15) utilisé	41

Figure III-4 : Etuve à 105° C	42
Figure III-5 les bacs rempli de sable 0/1,0/3,3/8,	42
Figure III-6 : Chiffons absorbant, doux et secs	42
Figure III-7: Éprouvette cubique	42
Figure III-8 Courbe granulométrique du sable (0/1) utilisé	46
Figure III-9: Courbe granulométrique du sable (0/3) utilisé	47
Figure III-10: Essai équivalent de sable et balance	48
Figure III-11 machine d'agitation.....	49
Figure III-12 essai de compression.....	53
Figure III-13: essai de traction par fendage.....	54
Figure III-14: compactage d'un BCR selon procède Proctor modifier	55
Figure III-15: compactage automatique d'un BCR	56
Figure III-16 : compactage avec table vibrante	56

Chapitre IV: Formulation du BCR

Figure IV-1 courbe de référence T-F-T Pour $n = [0.25, 0.45]$ avec de fuseau de BCR	59
Figure IV.2 : Exemple de courbe granulométrique de référence	60
Figure IV.3 : Relation expérimentale entre la maniabilité	62
Figure. IV.4. Détermination de la granulométrie optimale	64
Figure IV.5 Courbe de la variation de la densité sèche	67

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur la chaussée rigide

Chapitre II : Généralités sur le BCR

Chapitre III : Caractéristique des matériaux

Tableau III-1 Résultats de l'analyse granulométrique du sable 3/8.....	40
Tableau III-2 Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.....	41
Tableau III-3 Masse volumique réelle, Masse volumique apparente des graviers	43
Tableau III-4. résultats de l'essai los Angeles de gravier 8/15	44
Tableau III-5 : résultat l'absorption des graviers 3/8 et 8/15,	44
Tableau III-6. caractéristique physico-mécanique du gravier 8/15 et 3/8.....	44
Tableau III-7 Résultats de l'analyse granulométrique du sable 0/1.....	45
Tableau III-8: Résultats d'analyse granulométrique du sable 0/3	46
Tableau III-9: Grosseur ou finesse en fonction du module de finesse	47
Tableau III-10 : essai équivalent de sable deux type 0/1 et 0/3	49
Tableau III-11 : Masse volumique réelle, Masse volumique apparente des sables 0/1et 0/3 ..	50
Tableau III-12: Résultats de la mesure de l'absorption des sables 0/1 et 0/3	50
Tableau III.13. Les résultats de l'essai au Bleu de Méthylène du sable 0/3.....	51
Tableau III.14 : Propriétés physico-chimiques des sable 0/1et 0/3	51
Tableau III.15 : Les essais physiques sur les ciments	52
Tableau III.16 : Composition chimique du ciment	52
TableauIII 17 : Caractéristique mécanique de ciment	52
Tableau III-18 Composition minéralogique du ciment.....	52

Tableau III-19 Caractéristiques du ciment CPJ-CEMII 32.5 [2]	53
--	----

Chapitre IV: Formulation du BCR

Tableau IV-1 Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône.....	61
Tableau IV-2 résultat des volumes de mélange	63
Tableau IV.3 pourcentages des agrégats avec courbe de référence T-F-T	64
Tableau IV-4 les proportions massiques des agrégats et l'humidité.....	65
Tableau IV-5 composition granulaire du béton d'un BCR	65
Tableau IV-6 composition du BCR.....	66
Tableau IV-7 résultats de la Résistance à compression (BCR).....	69
Tableau IV-8 résultats de traction par fendage de (BCR)	69

Liste des Abréviation

AASHTO : American Association of State Highway and Transport Officials

BCR : Béton Compacté au Rouleau

CPA : Ciment Portland Artificiel

CPJ : Ciment Portland Composé

CLK : Ciment de Laitier au Clinker

CBR : California Bearing Ratio Test

CRS : Ciment résistant aux sulfates

CPZ : Ciment à la pouzzolane

GNT : Grave non traitée

LA : Los Angeles

OPM : Optimum Proctor Modifié

PST : partie supérieure des terrassements

PL : Poids Lourds

RP1 : Le réseau principal de niveau 1

T-F-T : Talbot-Fuller-Thompson

TJMA : Trafic Journalier Moyen Annuel

LISTE DES SYMBOLES

a : Taux d'actualisation

C : Taux de croissance annuel du trafic

D : Dimension maximale du granulat

d : Ouverture d'un tamis

E/C : Rapport eau sur ciment

K : Indice de serrage

N : Trafic cumulé poids lourds

n : Période de service

MF : module de finesse

dc : poids spécifique du ciment

Mc : masse du ciment

Me : masse de l'eau

P : Pourcentage passant le tamis d'ouverture d

Rt : Résistance en traction du BCR

Rc : Résistance en compression du BCR

V : Volume

VP : Volume de pâte dans 1m³ de BCR

Vvc : Volume des vides dans 1m³ de granulat compacte

ρ : Masse volumique

r : Taux annuel de croissance du trafic

γ : Compacité virtuelle d'un mélange granulaire

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les pays du monde construisent des structures routières depuis l'Antiquité pour faciliter le processus de communication, relier les frontières entre eux et réaliser une économie développée à l'ombre de la modernité et de la technologie.

L'Algérie compte l'un des réseaux routiers les plus importants du Maghreb et d'Afrique, d'une longueur de 133 741 km, le réseau routier est en plein développement grâce au programme de modernisation des transports routier et ferroviaire qui après la réalisation de l'Autoroute Est-Ouest de (1 216 km) prévoit la réalisation de l'autoroute des hauts plateaux de (1 330 km), et la réalisation de 19 000 km de nouvelles routes, ainsi la finition de la route transsaharienne (nord-sud).

L'Algérie prévoit aussi un surplus de la production nationale du ciment qui va s'élever à 11 millions de tonnes à l'horizon 2022. Dans ce cadre, il est envisagé d'assurer des débouchés commerciaux à la massive surcapacité de production de ciment et introduire des solutions éprouvées et meilleures pour la construction de nos routes de manière plus rapide, plus durable et tout en réduisant l'empreinte environnementale. Cette prise de décision d'opter pour la construction des routes en béton procure plusieurs avantages quoique le coût de la mise en œuvre au ciment soit plus élevé que celle du bitume.

Pour cette étude nous nous sommes intéressées à l'utilisation du Béton Compacté au Rouleau (BCR) comme revêtement des chaussées. Le BCR est un béton sec (mélange d'eau, de ciment, de granulats, d'adjuvants et d'ajouts cimentaires si requis) qui nécessite l'apport d'une énergie de compactage pour être bien consolidé.

Le présent mémoire se subdivise en quatre chapitres. Le premier chapitre comprend Des généralités sur la chaussée rigide.

Le deuxième chapitre dresse une synthèse sur Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) les méthodes de confection et de mise en œuvre du BCR.

Le troisième chapitre présente la caractérisation des différents matériaux utilisés dans la confection de notre BCR. On termine par le quatrième chapitre étude de formulation de BCR en utilisant la méthode de Talbot –Fuller -Thompson (T-F-T) et les essais caractéristiques du BCR à l'état frais et durcis.

Chapitre I :
Généralités sur la chaussée rigide

I. Introduction

Les routes constituent l'un des éléments indispensables à la croissance et au développement socio-économique. L'infrastructure routière reste l'un des piliers du développement en vue de l'accélération de la croissance et de la réduction de la pauvreté. Dans ce chapitre nous présentons une introduction à la chaussée rigide, son comportement mécanique et leur utilisation dans le monde et en Algérie.

I.2. Historique de la route en Algérie

a) Période avant la colonisation française :

L'Algérie de par sa position géographique a toujours été une terre convoitée ; et de ce fait a connu de multiples invasions et occupations

- Les Carthaginois
- Les romains :

Les romains s'étaient illustrés plus dans les constructions des voies que des ports, se contentant pour ces derniers de consolider, agrandir et moderniser ceux, nombreux d'ailleurs existant depuis les époques puniques et carthagoises, pour les adapter à leurs besoins de transport tant des groupes que des marchandises.

b) Période de la colonisation française :

Une fois de plus, la convoitise de ses terres fertiles en Blé, allait valoir à l'Algérie, une autre occupation, celle de la France dont les troupes débarquèrent à Alger en 1830, en prélude à une colonisation systématique et méthodique du pays qui allait durer 132 ans. [1]

A partir de 1847, l'autorité militaire se préoccupa de développer largement le réseau routier afin, tout en assurant le ravitaillement des premiers colons de permettre aux troupes de se porter rapidement sur les points menacés par une résistance qui ne désarmait pas.

Dès 1850, une étape substantielle était déjà réalisée. On disposait, en effet de :

- 450 km de routes empierrées ou entretenues.
- 450 km de routes ouvertes en terrassement
- 1650 km de routes aménagées au moyen de simples travaux de campagnes.
- En outre, 2250 km étaient à l'étude.

Avant l'indépendance Le réseau routier national comprenait déjà des routes distinguées par un classement à savoir,

- Routes Nationales
- Chemins Départementaux
- Chemins Vicinaux
- Chemins Ruraux

Année 1948 : Le réseau routier en Algérie comptait environ 60 050 km

c) Année Périodes post indépendance :

Entre 1962 et 1999 le réseau routier a progressé en linéaire de plus de 37000 km, soit une progression de plus de 55% sur une période de 37 ans par rapport l'année 1962. L'extension de ce réseau s'est poursuivie au-delà de 1999.

A l'indépendance le réseau routier comptait 67000 km

Au cours des années 90 le Ministère des Travaux a entrepris un ensemble d'actions volontaristes d'aménagement de liaisons de désenclavement des hauts plateaux et du grand sud.

Etape 2010-2016, durant cette période une grande évolution du réseau routier a été enregistrée

- Livraison de 609 km d'autoroute
- Livraison de 4400 km de routes
- Construction et rénovation de 890 ouvrages d'art [1]

Et l'année 2017 l'Algérie lance un projet deux autoroutes à étages, qui réalisées de manière superposée avec la rocade sud (aéroport- Zéralda) et de l'autoroute est (aéroport-Alger centre)

Entre 2010-2020

Continuité de l'extension de capacité du réseau (plus de 8.500 Km).

- Réalisation de la 3ème rocade sud d'Alger ;

- Préservation du patrimoine et de l'environnement.

- Renforcement des axes structurants dans les Hauts Plateaux par un maillage du réseau dans cette région en vue de s'inscrire dans l'option des Hauts Plateaux au titre de l'aménagement du territoire.

- Grand Sud : effort axé sur le développement des liaisons principales et de routes frontalières pour le désenclavement et l'ouverture vers

L'Afrique.

L'année 2021 :

Le projet de réalisation de la route nationale reliant sur 460 kilomètres les wilayas de Tindouf et Adrar sera finalisé dans le courant du second semestre 2021.

I.3. Les chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide. En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol support, les couches suivantes

- Une couche de forme,
- Une couche de fondation,
- Une couche de roulement en béton de ciment.

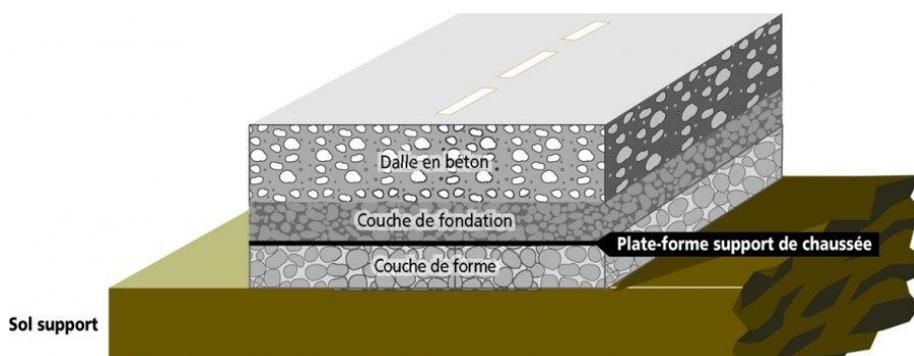


Figure I.1: structure –type d'une chaussée a trafic > 50 PL /j

Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic (trafic ≤ 50 PL/j/sens), la couche de fondation n'est pas nécessaire. La dalle en Béton de Ciment peut ainsi être réalisée directement sur l'arase terrassement (avec une couche de réglage éventuelle) ou sur la plate-forme support de chaussée (figure I.2) [2]

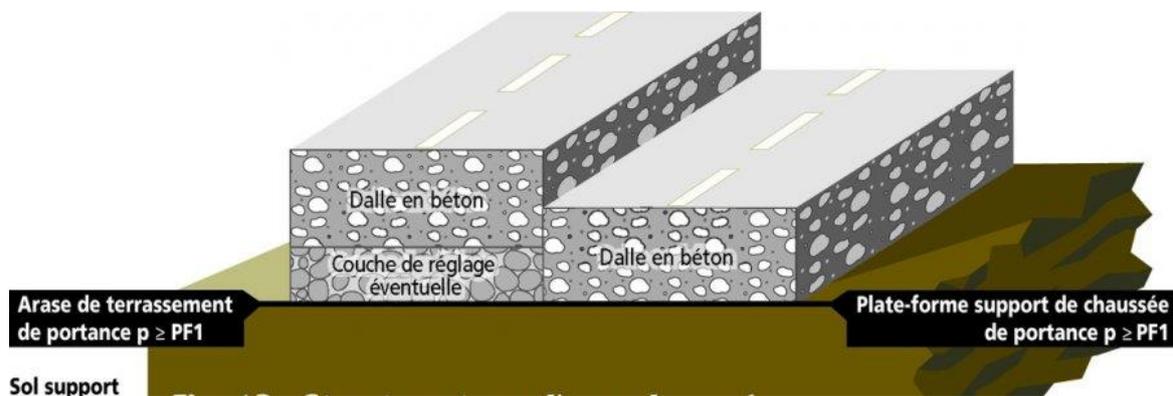


Figure I.2 : structure –type d'une chaussée à trafic ≤ 50 PL/j

I.4 Les différents types de chaussées en béton

I.4.1 Les dalles courtes en béton non armé

Nous venons de voir, au paragraphe précédent, la conception de ce type de chaussée en béton et les problèmes rencontrés au niveau des joints transversaux afin d'améliorer le comportement de cette structure, diverses solutions sont possibles notamment en renforçant le béton par des aciers

I.4.2 Les dalles courtes goujonnées

Des goujons en acier sont mis en œuvre au niveau de chaque joint transversal comme figure sur le schéma ci-après

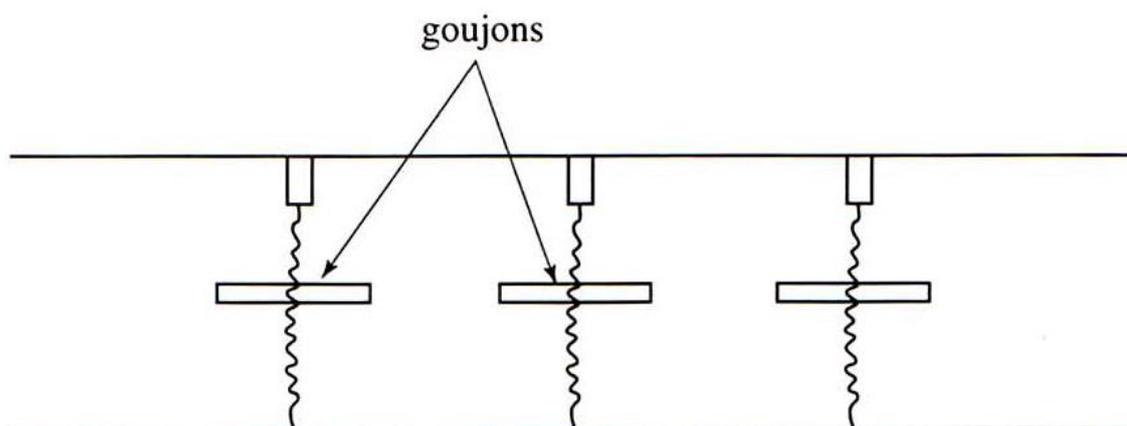


Fig : I.3 : principe des dalle courtes, en béton non armé et joints transversaux goujonnés

Les goujons (fig 4) sont des barres d'acier lisse de nuance Fe E24 de diamètre 25 mm et de longueur de 60 cm ces goujons sont enduit d'un film bitumineux limitant le coulage du goujon au béton pour permettre les mouvements horizontaux mais suffisamment mince pour qu'il n'y ait pas de jeu vertical (épaisseur entre 0.06 et 0.20 mm)

Ce film a aussi un rôle de protection contre la corrosion.

Les goujons sont placés parallèlement à l'axe longitudinal de la chaussée à mi-épaisseur de la dalle.

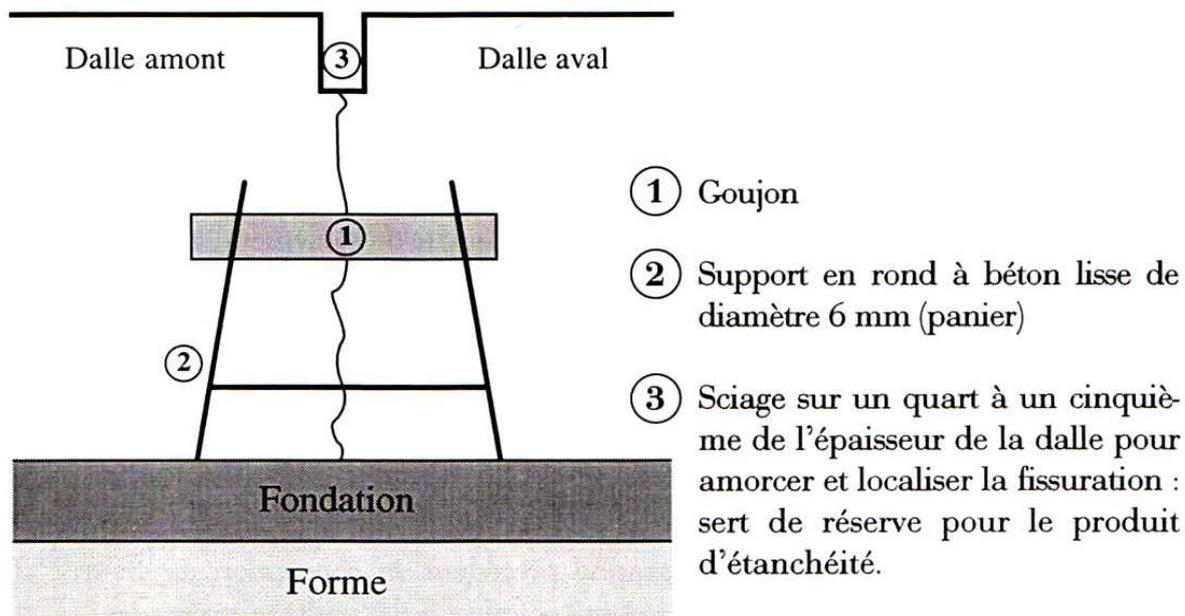


Fig. I.4 : joint transversal de retrait-flexion goujonné

I.5. La technique du béton armé continu (B.A.C)

Le principe du béton armé continu est de laisser se former les fissures de façon aléatoire, mais de limiter leur ouverture et d'assurer en continuité les transferts de charge à l'aide d'armatures continues.

Cette technique a vu le jour aux U.S.A dans les années 1950 pour la réalisation d'autoroutes du réseau "Inter-States". En Europe, cette technique a commencé à être utilisée par la Belgique, en 1970, pour la construction de l'autoroute Bruxelles - Liège.

En France, les premiers travaux remontent à 1983 avec la réalisation d'un chantier de recouvrement d'une ancienne chaussée en dalles californiennes sur l'autoroute A6 dans la région d'Auxerre

Le B.A.C : est donc le seul type de chaussée en béton sans joint l'épaisseur des dalles est de l'ordre de 23 à 25 cm dans le cas d'une chaussée neuve et de 18 à 20 cm dans le cas d'un rechargement

L'utilisation de cette technique est freinée par son coût élevé lié à l'ajout d'acier au béton. [3]

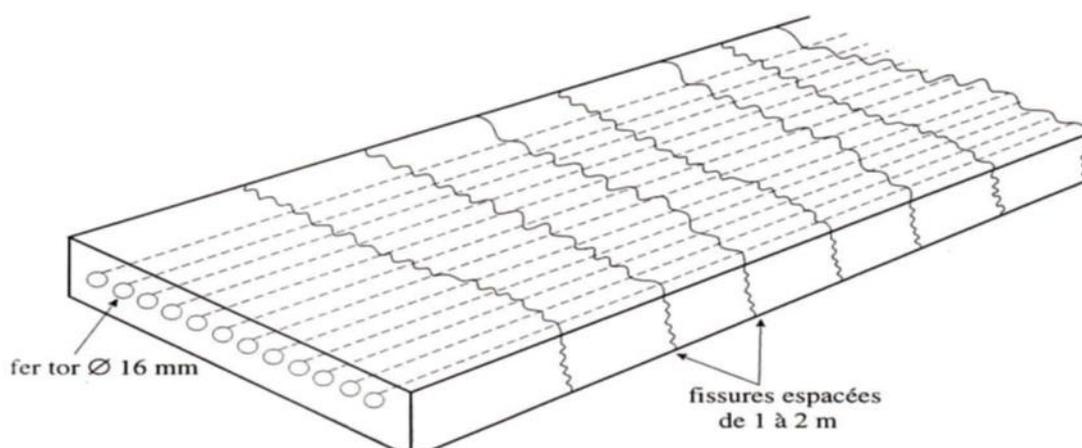


Fig.I.5. principe du béton armé continu les armatures longitudinales empêchent l'essentiel de retrait d'hydratation du béton dont les fissures sont alors très rapprochées (intervalle moyenne de l'ordre de 1.5 m) et très fines

I.6 Propriétés mécaniques générales

I.6.1 Prise et durcissement

Le ciment, poudre finement broyée, mélangé avec une proportion d'eau suffisante, forme une pâte molle qui garde en apparence la même consistance durant un temps caractéristique de la nature du ciment utilisé.

A un moment donnée, un phénomène brusque apparait, il se produit une augmentation brutale de la viscosité de la pâte ; c'est le début de prise ; en même temps, la chaleur de prise commence à se dégager ; ce phénomène correspond à la précipitation des sels hydratés qui se trouvent en solution sursaturée, du fait de la dissolution des sels anhydres.

A partir de ce moment, le durcissement va en progressant suivant une courbe continue et on définit conventionnellement un fin de prise correspondant au moment où la pâte cesse d'être pratiquement déformable (à titre indicatif, la prise d'un ciment peut durer de 1/4 d'heure à une 1/2 journée environ)

Après la fin de prise, le phénomène se poursuit, on a alors la période de durcissement.

Le durcissement est produit par l'enchevêtrement des aiguilles formées par les cristaux hydratés et correspondant à un épaissement progressif du feutrage ainsi amorcé le durcissement n'est pas un stade distinct de la prise, c'est le développement des réactions chimiques d'hydratation amorcées lors de la prise. [3]

I.6.2 Résistance à la compression et à la traction :

Au durcissement d'un liant et donc du béton, correspond un accroissement plus ou moins rapide des résistances, la résistance maximum n'est d'ailleurs atteinte qu'asymptotiquement (fig. 1)

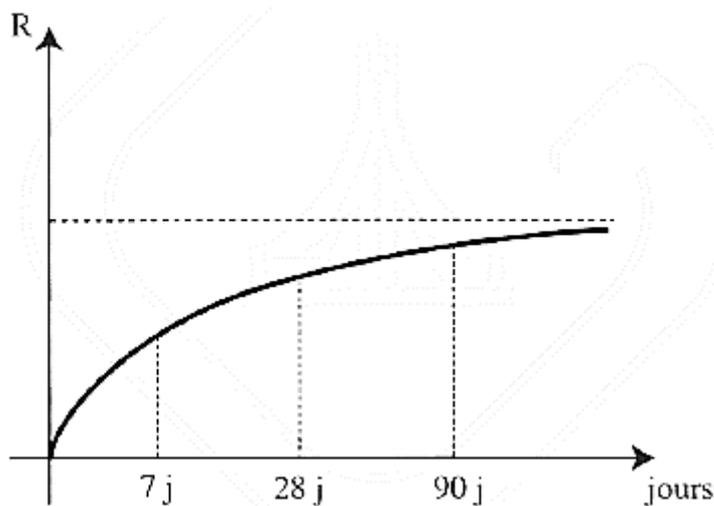


Fig. I.6 : la résistance à la compression à la fonction du temps tend asymptotiquement vers une limite

On a longtemps considéré comme caractéristique essentielle du béton la résistance à la compression, parce que c'est elle qui intervient habituellement dans le calcul des ouvrages.

Le béton est un matériau relativement fragile, sa résistance à la traction est faible (environ 10 fois inférieure à la résistance à la compression). En tout état de cause, la résistance à la traction dépend (d'une manière plus importante que la compression) de l'adhérence des granulats au ciment.

I.6.3 Influence de la compacité

La compacité des bétons a une importance capitale, les meilleures résistances à la compression étant obtenues avec les mélanges offrant le minimum de vides ces mélanges procurent en outre le maximum d'économie car il faut moins de pâte de ciment pour les agglomérer.

L'influence de la compacité a été mise en évidence par Féret.

Des bétons gâchés avec le même rapport eau /ciment $E/C = 0.50$, et des granulométries différentes ont donné des résistances variant dans des proportions de 1 à 3,4 alors que selon d'autres formules elles auraient dû être les mêmes.

La compacité augmente en outre la résistance aux intempéries en évitant la désagrégation du béton, et diminue le retrait, le fluage et la perméabilité.

L'amélioration de compacité qui dépend du dosage en liant, de la nature et de la granulométrie des granulats et de la quantité d'eau de gâchage est obtenue par différents procédés de mise en place du béton, notamment la vibration, qui entraîne le tassement des matériaux et facilite l'élimination de l'air et donc des vides.

I.7 Comportement des chaussées rigides

I.7.1-fonctionnement d'une chaussée en béton du type "dalles"

A cause du phénomène de fissuration dû au retrait du béton vu au paragraphe et aux effets de la température, on est amené, pour maîtriser ce problème, à réaliser des joints Longitudinaux et transversaux comme précisé sur la figure 7.

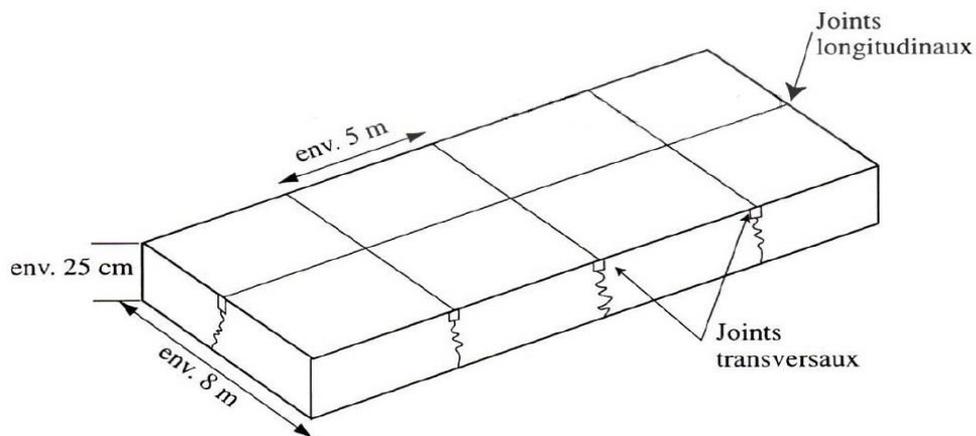


Fig. I.7 : Schéma de principe d'une chaussée en béton traditionnelle

On réalise en général ces joints par sciage du béton sur environ 1/5 de l'épaisseur de la dalle. Cette opération, qui doit être réalisée dès que le béton est "circulable" et avant qu'il ne fissure a pour effet de créer un point faible dans le béton, de façon à provoquer la fissuration sous le trait de scie.

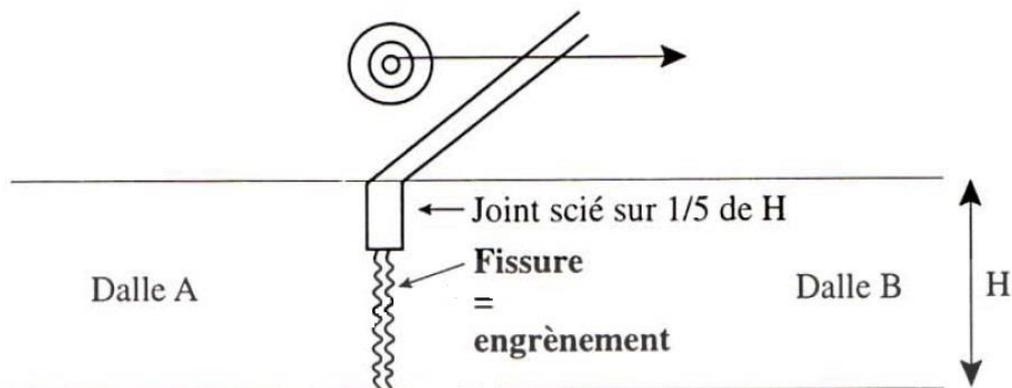


Fig. I.8: Fonctionnement d'une chaussée en béton (technique des dalles californiennes)

Lors du passage d'un véhicule, la dalle amont A est chargée progressivement, puis au passage du joint transversal, le bord de la dalle aval B est chargé brusquement. Ceci a pour effet de créer un mouvement vertical relatif entre les bords des deux dalles. Ce mouvement vertical sera atténué s'il se produit, au moins partiellement, un transfert de charge de la dalle A vers la dalle B.

Dans le cas d'un joint classique (dit de retrait flexion) scié sur seulement 1/5 de l'épaisseur et fissuré sur le reste de l'épaisseur, il se produit grâce au contact entre les granulats situés de part et d'autre de la fissure, un phénomène d'engrènement" qui va favoriser le transfert de la charge d'une dalle à l'autre et s'opposer au mouvement vertical dalle à l'autre et s'opposer a différentiel entre les deux dalles A

Malheureusement, sous l'effet répété des charges, la qualité de cet "engrènementTM s'altère par l'abrasion des granulats en contact au niveau de la fissure, et ce phénomène sera d'autant plus rapide que le trafic lourd sera important et la dureté des granulats (notamment la résistance à l'attrition mesurée avec l'essai MDE) faible.

En tout état de cause, on peut dire que le phénomène de battement des dalles est inéluctable dans les chaussées en béton sans armature, ni goujon de liaison), en raison du faible poids relatif d'une dalle par rapport à celui d'un poids lourd.

Le battement des dalles est en lui-même un phénomène mécanique dommageable à la bonne tenue de la chaussée, car le transfert brutal de la charge de la dalle amont à la dalle aval occasionne un choc violent sur la partie supérieure de la couche de fondation

Si cet effort mécanique se produit en présence d'eau (ce qui est souvent le cas, car le battement de dalle entraîne la détérioration du joint bitumineux censé assurer l'étanchéité à la surface de la chaussée), il se produit une désorganisation de la partie supérieure de la couche de fondation, qui réduite à l'état de poudre, remonte à la surface par les joints transversaux sous la forme de "laitance" (mélange de matériaux broyés et d'eau)

Ce départ de matériaux se traduit par la formation de "cavité" sous le bord de la dalle et la mise en escalier de la dalle aval par rapport à la dalle amont. Le phénomène peut se poursuivre jusqu'à rupture de la dalle qui ne repose plus sur toute sa longueur.

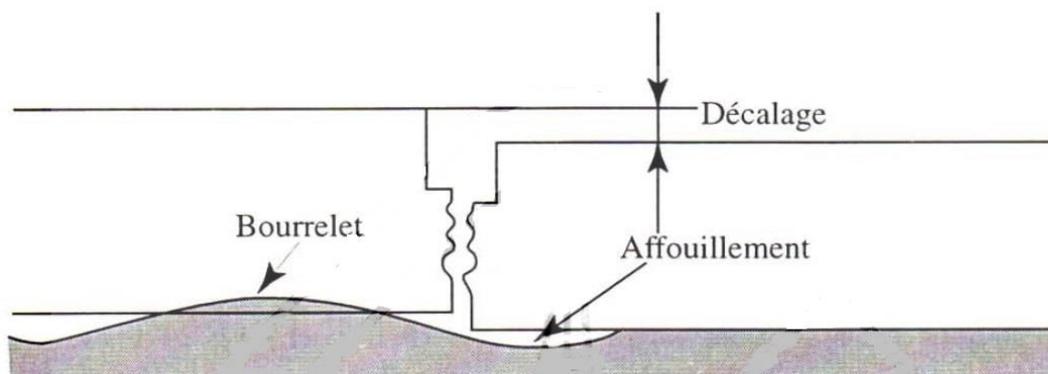


Fig.I.9 : Mise en escalier des dalles suite au phénomène de "pompage"

Cette pathologie caractéristique des chaussées en béton de type "dalles californiennes", est combattue en :

- choisissant des granulats ayant de bonnes caractéristiques mécaniques pour résister au phénomène d'attrition,
- retenant des couches de fondation moins sensibles aux problèmes d'érosion et d'attrition.
- réalisant des joints étanches,
- recouvrant la chaussée en béton par une couche de roulement étanche comme un enduit superficiel.

I.7.2 La mise en œuvre

I.7.2.1 Le répandage

Longtemps exécutée entre coffrages fixes, la mise en œuvre des bétons routiers se fait exclusivement par machines à coffrages glissants

Avec une telle machine sont regroupées en quelque mètres les opérations de Réparation, serrage, moulage, lissage et éventuellement cloutage du béton

Le béton est décoffré immédiatement après les dernières opérations, c'est-à-dire que la tenue du béton doit être suffisante pour qu'il ne se produise aucun affaissement des bords

Le moulage du béton qui se déverse assez ferme à l'avant de la machine, est rendu possible par la vibration à laquelle il est soumis, de façon à le rendre plastique.

Les coffrages latéraux ont une longueur de 5m environ, le béton est donc décoffré deux minutes environ après avoir été introduit dans le bac de pervibration

Le rôle des pervibrateurs est essentiel, et la panne de l'un d'eux doit être détectée

Par des voyants sur le tableau de commande de la machine.

Plusieurs types de machines à coffrages glissants sont actuellement utilisés, il s'agit de la machine Guntert et Zimmerman, de l'Autograde C.M.I et des machines GOMACO dont les

principes sont identiques la première comportant un bâti se déplaçant à l'aide de deux chenilles, la seconde quatre et la troisième deux, trois ou quatre suivant les modèles.

A l'arrière de la machine, on trouve un équipement permettant de réaliser le traitement de surface (voir paragraphe suivant. En effet, à la sortie de la nuachine à coffrage glissant, le béton apparaît comme extrêmement lisse et fermé par suite de la remontée de la laitance du ciment à la surface sous l'effet de la vibration

Une fois le traitement de surface réalisé, le béton doit recevoir un produit de cure

Destiné à éviter l'évaporation de l'eau et la dessiccation du béton frais. Ce produit est, en général, une solution de résine ou de caoutchouc chloré dans un solvant. La machine de répandage (une rampe avec des pulvérisateurs) est souvent couplée avec celle du striage

I.7.2.2 La confection des joints de retrait – flexion

Nous avons vu qu'une fissuration se produit au moins tous les 5 ou 6 mètres dans une dalle béton lors du durcissement. Pour prévenir et localiser de manière franche les fissures, ils sont réalisés sur environ un cinquième de l'épaisseur de la dalle pour créer à coup sûr la fissure sur le reste de l'épaisseur.

Les joints sont généralement sciés dans le béton durci, suffisamment tôt pour précéder toute fissuration, suffisamment tard pour qu'il n'y ait ni effritement, ni arrachement sous l'action de la scie (en pratique entre 6 et 24 heures).

Le moment à partir duquel il faut commencer à scier dépend de plusieurs paramètres :

des paramètres intérieurs: nature du granulat, ciment, dosage, etc.,

des paramètres extérieurs: température, hygrométrie, cadence du chantier, distance entre les joints.

Il peut y avoir fissuration spontanée si la température s'élève, également en cas de baisse rapide de l'hygrométrie, ensoleillement et vent, donc évaporation rapide de l'eau.

La largeur du trait de sciage fait 4 à 5 mm, mais suivant la saison à laquelle ce sciage a eu lieu, le joint pourra se refermer l'été jusqu'à se réduire à 1 ou 2 mm, ou au contraire s'ouvrir l'hiver jusqu'à 7 ou 8 mm.

Pour empêcher l'eau de s'infiltrer par les joints et donc d'atteindre le niveau des fondations, on les garnit d'un produit d'étanchéité dont on attend les performances suivantes:

une adhérence aux bords du joint

une compressibilité sans dépassement de la surface,

une extensibilité de l'ordre de 3 fois sa largeur initiale, un non vieillissement aux efforts alternés, à l'ensoleillement, aux variations de température, aux produits pétroliers

L'étanchéité est obtenue, en général, avec les matériaux suivants:

- des produits coulés en place à chaud.

Il s'agit de mastics à base de bitume ou de goudron, contenant une petite proportion d'élastomères (souvent du PVC).

des produits coulés en place à froid. Il s'agit de pâtes à base d'élastomères durcissant à l'air ou après mélange de deux composants.

Les joints longitudinaux sont, en général, réalisés selon les dispositions retenues pour les joints transversaux. Seule différence, le sciage peut être réalisé un peu plus tard (entre 12 et 24 heures voire plus).

Enfin, il faut signaler la technique des joints moulés dans le béton frais, qui consiste à introduire une languette en plastique dans la partie supérieure de la dalle, languette qui reste dans le béton après son durcissement.[3]

I.7.2.3 les traitements de surface

I.7.2.3.1 Le striage longitudinal à la toile de jute.

Utilisé jusqu'en 1967, ce procédé qui consistait à essorer la laitance en traînant une toile de jute à la surface du béton a été abandonné, car conduisant à des caractéristiques de surface insuffisantes. La hauteur au sable (notion qui caractérise la hauteur moyenne des aspérités) n'était que de 0,2 à 0,3 mm, alors qu'il faut au moins 0,6 mm pour assurer une macro-rugosité convenable.

I.7.2.4 Le striage transversal

Afin d'augmenter la rugosité de surface, on procède à un balayage transversal du béton frais à l'aide d'un balai à gros poils, ce qui permet d'obtenir une hauteur au sable à 1.6mm. importante (1,0 à 1,6 mm)

I.7.2.5 Le cloutage

Cette solution s'inspire de la technique des bétons bitumineux cloutés "Les enrobés à chaud". L'opération consiste à incruster dans le béton frais des gravillons de calibre 10/14 mm ou 14/18 mm, gravillons ayant d'excellentes caractéristiques au plan de la dureté (LA et MDE) et du polissage (CPA)

Comme pour les enrobés à chaud, on utilise la technique du cloutage, lorsque les granulats qui entrent dans la composition du béton, ont de mauvaises caractéristiques au plan du polissage (granulats calcaires en général).

I.7.2.6 Le dénudage chimique

Il s'agit d'une technique couramment utilisée une dizaine d'années et dont le principe est le suivant.

On répand sur le béton frais une solution de retardateur de prise qui agit pendant environ 24 heures sur les quelques millimètres supérieurs du béton. La surface de la dalle est ensuite recouverte par une feuille de polyéthylène qui la protège, ainsi que le retardateur, de la dessiccation et des intempéries. Au bout de 24 heures, alors que le béton a suffisamment durci pour supporter un trafic léger, la feuille de protection est enlevée, et on procède à un brossage de la surface du béton à sec ou à l'eau sous pression, pour enlever la laitance qui n'a pas pu faire prise à cause du retardateur, et dégager ainsi les grains du béton. Les hauteurs au sable obtenues se situent entre 1,5 et 2 mm.[3]

I.8 Les avantages et l'inconvénient

Un intérêt croissant pour les structures en béton se développe, pour la construction des pistes cyclables. Cet essor est dû à plusieurs raisons :

I.8.1 techniques:

Le revêtement en béton présente les avantages techniques suivants :

- polyvalence: fonction circulation et fonction esthétique,
- solidité et résistance à l'érosion,
- L'épaisseur de la fondation n'a pas d'incidence sur la tenue de la dalle

I.8.2 Les avantages :

- E élevé, indépendant de la température et de la durée d'application de la charge
 $E = 35\ 000\ \text{MPa}$
- Donc absence d'orniérage
- Résistance à la compression très élevée
- Résistance à la traction appréciable : $R_{tf} = 2,7$ à $3,3\ \text{MPa}$
- Courbe de fatigue relativement plate: résistance élevée à la répétition des charges
- Une bonne tenue à la fatigue
- sécurité

I.8.3 économiques:

Les avantages économiques sont :

Relativement plate

- durabilité,
- coût d'entretien réduit.
- Le développement de cette technique depuis plusieurs années est un des signes

Concrets qui traduisent bien cette prise de conscience vers une politique d'aménagement

À long terme, autant qualitative que quantitative

I.8.4 Les inconvénients

- Retrait hydraulique et thermique: Susceptibilité à la fissuration, donc nécessité de réaliser des joints, d'où discontinuité
- Module d'élasticité élevé
- Courbe de fatigue plate
- Sensibilité à un sous-dimensionnement
- Taux de liant élevé: 12 à 15 % d'où handicap économique [7].

I.9 Conclusion :

La plupart des décideurs sont persuadés qu'une route en béton présente de nombreux avantages à long terme et que sur le plan économique, le choix du béton devient la solution la plus favorable lorsque les coûts d'entretien sur la durée de vie de la structure sont également intégrés dans l'équation. Cette affirmation s'applique aussi lorsque les coûts pour l'utilisateur sont pris en compte, surtout grâce au peu d'entretien que nécessite le béton, ce qui réduit la gêne occasionnée aux usagers. Toutefois, de nos jours, il est devenu tout aussi important de démontrer que les routes en béton présentent également un avantage pour l'environnement et qu'elles constituent des solutions acceptables sur le plan social pour la problématique de la mobilité.

Chapitre II
Généralités sur le BCR

II.1 Introduction :

Ce chapitre présente une revue bibliographique sur la technologie du Béton Compacté au Rouleau (BCR). Il explore notamment la notion du BCR et son historique et les techniques d'utilisation du BCR dans les routes. Outre Les performances et les caractéristiques du BCR, les procédés et techniques de mise en œuvre ainsi que les méthodes de formulations sont aussi présentés dans ce chapitre.

II.2. Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) :

Le BCR est un béton à affaissement nul (béton très ferme), qui est composé des mêmes constituants qu'un béton ordinaire. Il est préparé comme un béton puis mis en place et compacté comme un sol, à l'aide d'engins des travaux publics (paveuses et rouleaux compacteurs).

Le rapport de l'Institut Américain du Béton [6] définit le BCR comme un béton compacté à l'aide des rouleaux compacteurs; à son état frais, il va supporter la surcharge induite par les rouleaux vibrateurs ce qui permet de le serrer. L'aspect sec du BCR nécessite l'application d'une énergie de compactage pour le consolider. La consistance du mélange doit être donc, d'une part, suffisamment rigide pour le maintenir stable sous les rouleaux compacteurs et, d'autre part, assez humide et maniable pour éviter les ségrégations

Le BCR est un matériau intermédiaire entre le sol et le béton. Dans les premières heures de son malaxage il se comporte comme un sol (techniques de mise en place et compactage) et après quelques jours, il devient un béton indéformable; entre les deux, c'est un matériau avec des propriétés assez mal connues et nécessite des recherches tant sur les plans théoriques qu'expérimentales pour comprendre ses mécanismes fondamentaux de comportement

D'après Vahedifard et al. (2010), le gain en coût associé à l'utilisation du BCR en tant que matériau de construction alternatif, pour les routes fortement sollicitées, a montré des économies initiales qui peuvent arriver à 58%, par rapport à l'utilisation du béton de pavage classique.



Figure II 1: Equipement du compactage du BCR.

II.3. Historique :

II.4. Les constituants :

Des chercheurs tel que Jeuffroy et Sauterey ont considéré que l'emploi des liants hydrauliques ou pouzzolaniques dans les structures de chaussées a commencé dès le 1^{er} siècle avant J-C par les Romains, puisqu'une proportion de liant (2 parties de pouzzolane naturelle + 1 partie de chaux) a été destinée et utilisée pour lier les pierres des chaussées romaines. Ces chaussées, assurant le roulage des chars, sont composés par de dalles et sont considérées comme les ancêtres des chaussées rigides en béton.

En France, les chaussées en béton ont été réalisées au début du 20^{ème} siècle sur quelques tronçons de routes d'approvisionnement dans la zone de Grenoble entre les cimenteries et les carrières. C'est en 1924 que la direction des Ponts et Chaussées du Pas-de-Calais, a lancé un programme de transformation d'empierrements et d'anciens pavages en béton, notamment sur la route Nationale N° 43 entre Lillers et Chocques.

Après ce succès plusieurs autres projets ont été réalisés dans le département du Nord pour la construction des routes nationales et de voies départementales de longueur totale dépassant 100 km. Le procédé consiste à la récupération des pavés pour construire des bordures et des 02 caniveaux afin de caler la chaussée en béton. On a utilisé aussi le sable de pavage de l'ancienne chaussée comme une couche de base. Cette couche a été d'abord étalé puis compacté, sur laquelle un béton relativement sec était mis en place et cylindré. Ce procédé peut être considéré

comme l'ancêtre du Béton Compacté. La chaussée ainsi construite, est composée de deux couches, une couche inférieure réalisée avec des matériaux roulés et un faible dosage en ciment (250 kg/ m³), alors que la couche supérieure est plus mince et plus fortement dosée (400 kg/m³) et elle est à base de granulats durs concassés. Les deux couches sont exécutées l'une après l'autre sans interruption afin d'assurer une forte adhérence. Plusieurs autres applications ont été réalisées en Europe en général. Jeuffroy et Sauterey, ont indiqué que la Belgique avait réalisé, à partir de 1912, des routes et des aires bétonnées sur les accès des mines. L'Allemagne a réalisé aussi, à partir de 1933, les premiers grands chantiers de construction d'autoroutes avec chaussées rigides. La France a réalisé également en 1938, le tronçon de l'autoroute de l'Ouest de Saint-Cloud à Orgeval en béton. Le procédé consiste à l'utilisation de bétons relativement secs et le serrage était particulièrement énergique. La finition de ces bétons serrés, était assurée par une finisseuse transversale.

Dans le continent Américain, Anderson a relié l'utilisation du BCR aux années 1930. Aux USA la première chaussée rigide, d'après Huang a été construite en 1893 à Bellefontaine (Ohio) et la deuxième en 1908 à Michigan. Les premières utilisations du BCR sous forme de Bétons très maigres et Compactés au Rouleau pour la construction de barrages reviennent à 1960. Les statistiques de 2001 montrent que près de 95 000 km aux USA ont été construits en béton hydraulique. Selon Gauthier et al, la première construction d'un revêtement en BCR en Amérique du Nord date depuis 1942 par le corps des ingénieurs de l'armée américain (US Army Corps of Engineers) qui ont construit une voie à Yakima.

Gauthier et Marchand ont précisé que la première application du BCR au Canada date depuis 1976 et comporte la réalisation d'une aire de stockage de bois d'une surface de 52 000 m² sur l'Île de Vancouver par British Colomban Forest Company (BCFP). La même surface a été doublée en 1978. Ces premières applications ont été faites pour l'industrie forestière qui cherchait des pavages extrêmement résistants. Actuellement on construit des pavages en BCR avec des épaisseurs variant de 20 cm à un mètre pour la construction de rues, d'aires

industrielles et d'aires d'entrepôts.

Après ce succès plusieurs projets ont été réalisés en utilisant le BCR en pavage en Amérique, Espagne, Australie et d'autres pays. On remarque aussi, d'après Gauthier et al, que la majorité des revêtements en BCR construits dans le monde (USA, Canada, Espagne...) ont été fabriqués avec un ciment hydraulique de teneur totale compris entre 12 et 16% de la masse totale des constituants secs. On constate aussi une grande utilisation des ciments ternaires

Composés de ciment, de laitiers et de fumée de silice ou composés de ciment, de cendres volantes et de fumée de silice.

Au Canada, par exemple, le Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB), a réalisé une vaste étude sur la durabilité au gel et à l'écaillage de revêtements routiers en BCR. Cette étude a permis de développer des nouvelles méthodes de formulation et des nouvelles compositions pour des mélanges de BCR durables. Les bibliographies précisent qu'aucun projet de construction de revêtements en BCR n'a été réalisé jusqu'à maintenant au Québec en employant un mélange de BCR avec de faibles teneurs en ciment (teneur en ciment inférieure à 250 kg/m³).

En Tunisie et en Afrique, le BCR reste, jusqu'à maintenant, une nouvelle technique et il ne s'est développé que pour la construction des barrages tels que les Barrages d'Errmil en Tunisie, Koudiat Acerdoune en Algérie et Ain Al Koreima au Maroc, alors que l'utilisation de ce matériau pour la construction des chaussées n'est pas encore abordée.

En fin, en Algérie, Lafarge Holcim Algérie en partenariat avec l'entreprise Razel, réalisent le lundi 04 Décembre 2017 la rénovation de la route reliant la RN60 à la RN45 sur 3.6 km avec la solution BCR, cette solution innovante est particulièrement recommandée pour les tronçons routiers fortement sollicités afin de garantir leur longévité, selon les organisateurs de l'événement. Cette technique est de plus en plus utilisée pour tous les types de chaussée très sollicitée demandant une grande résistance et robustesse.

II.4.1. Le ciment

Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse (CaSO₄) finement broyés et d'ajouts éventuels, Des ajouts, tels que les cendres volantes, les fillers, les laitiers, etc., entrent dans la majorité des compositions du ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et/ou mécaniques.

D'après ployaert un ajout de cendres volantes est permis afin d'améliorer l'ouvrabilité et de diminuer le risque de fissuration, cet ajout est limité à un maximum de 5 % de la masse des granulats secs.

Indépendamment des économies réalisées par la diminution de la quantité de ciment dans les mélanges de BCR, les cendres volantes procurent certains bénéfices lors des opérations de mise en œuvre. Ainsi, certaines cendres volantes permettent d'améliorer la consolidation du BCR frais grâce à une augmentation du pourcentage de matériaux fins et ainsi obtenir, lors des opérations de compactage, une surface de revêtement plus fermée. La maniabilité du BCR frais est aussi influencée par l'ajout de cendres volantes au mélange. Les cendres volantes

influencent aussi certaines propriétés du BCR à l'état durci. Les résistances mécaniques à court terme sont généralement réduites. Par contre, on observe un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques à long terme. Jusqu'à maintenant, peu d'études ont porté sur l'influence des cendres volantes sur la durabilité des BCR.

Les laitiers de haut-fourneau sont des sous-produits de l'industrie de l'acier. Les laitiers possèdent une densité généralement comprise entre 2,85 et 2,95. La provenance des laitiers et la finesse du matériau influencent les propriétés du BCR à l'état frais et durci de même que le couplage avec un ciment donné (type et provenance).

II.4.2. Les granulats :

Les granulats occupent 75 à 85 % du volume total d'un mélange de BCR, ils jouent un rôle de remplissage et ont une grande influence, de par leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques sur les propriétés du BCR frais et durci.

Les granulats peuvent être roulés (sable siliceux) ou concassés (sable calcaire, gravier, grave...). Pour limiter les problèmes de ségrégation et en vue d'une meilleure qualité de surface, la dimension maximale du granulat D doit être inférieure à 20 mm, Le fuseau granulométrique doit être divisé en plusieurs fractions (exemple : 0/3-3/8-8/16).

Toutes les fractions granulométriques doivent avoir un indice de concassage supérieur à 30% Dans le cas d'un trafic trop faible et environ 100% dans le cas d'un trafic élevé.

Ces granulats ont un indice de plasticité non mesurable et une teneur en matière organique inférieur à 0.2 %. Il faut noter que le choix d'un D élevé a comme avantages :

- Une économie d'énergie à la préparation des matériaux ;
- Une résistance mécanique plus élevée à dosage de liant constant ;
- Une amélioration du transfert de charges aux joints en l'absence de dispositif particulier.

Quand max granulats fins, ils permettent une bonne cohésion à l'état frais, donc une bonne compacité à l'état durci. Toutefois, un pourcentage élevé de fines entraînerait une demande en eau importante et donc une baisse de la résistance et un problème de mise en place.

II.4.3. L'eau :

Le BCR étant un béton sec à affaissement nul. Sa teneur en eau doit donc être faible.

Elle est de l'ordre de 4 à 6%, fixé par le laboratoire lors de l'essai Proctor modifié. Quant à la teneur en eau au chantier, on doit tenir compte des conditions atmosphériques et de transport.

L'eau est de qualité potable avec une teneur en sels dissous inférieurs à 1 g/l et une teneur en matière de suspension inférieure à 0.5 %. Il faut noter qu'un excès d'eau entraîne une

instabilité rendant l'uni défectueux tandis qu'un manque d'eau entraîne des défauts de prise localisés.

II.4.4. Les fillers :

II.4.4.1. Définition :

Les normes Françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : Produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basaltes, laitiers, cendres Volantes...) naturels ou non. Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment Portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers. Selon la norme NF P 15-301, la teneur en filler calcaire est limitée à 5 % de la masse du ciment. Compte tenu des liaisons électriques entre cations et anions rompus par broyage du clinker et du gypse, on trouve à la surface des grains de ciment des sites chargés électriquement. Ces grains sont généralement chargés négativement, selon Bombléd [20]. IL y a trois fois plus de charges négatives que positives. Une des raisons qui motivent l'utilisation des fillers est la réduction du coût de production.

II.4.4.2. Effets :

Les fines calcaires ont une double action dans le béton. Au jeune âge, elles ont un effet accélérateur de l'hydratation. Les grains agissent comme des sites de nucléation et la probabilité que les C-S-H dissous rencontrent des particules solides, pour précipiter, est alors augmentée. Cet effet s'estompe après quelques jours. Elles ont aussi un effet liant, par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates. Farran et al. [22], avait aussi signalé la formation d'une liaison intime entre les granulats calcaires et la pâte du ciment qui résulterait de plusieurs mécanismes dont un fort accrochage mécanique dû à une surface de contact rugueuse et à une liaison physico-chimique entre les granulats calcaires et la pâte de ciment. Les fillers de même nature que les granulats contribuent à l'amélioration de l'adhérence pâte-granulats, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. On observe alors une amélioration des caractéristiques générales des bétons ordinaires. Buil et Paillere, ont constaté que l'utilisation des fillers améliore les performances mécaniques des bétons. Cette amélioration provient du rôle actif exercé par ces particules dans l'hydratation du ciment Les fillers calcaires ont pour principales actions : voir la figure (II.2)

rôle de remplissage : l'amélioration de la compacité des mélanges par effet granulaire.

Sa présence est complémentaire à celle du ciment pour combler les vides inters granulaires.

rôle rhéologique : par la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange frais et les résistances en compression aux jeunes âges du béton durci.

rôle physico-chimique : la présence des fillers calcaires dans un mélange cimentaire conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment générant un accroissement du taux d'hydrates formés et une structuration de la matrice cimentaire plus efficace ;

rôle chimique : par association avec les aluminates du ciment pour la formation de carboaluminates.

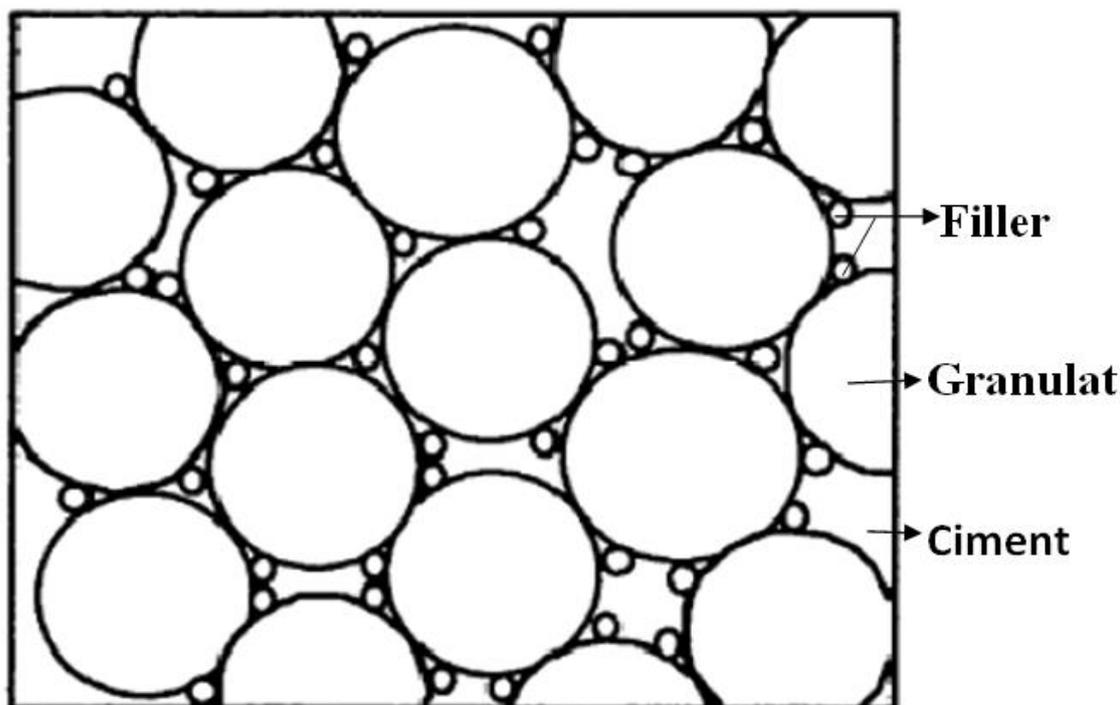


Figure II 2: Illustration de l'effet filler.

II.4.4.3. Les fillers confèrent aux bétons les propriétés suivantes

Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leurs propriétés physiques Sur certaines qualités du ciment :

- Accroissement de la maniabilité.
- Diminution de la perméabilité et de la capillarité.
- Réduction de la fissuration.
- Limite le ressuage.
- Augmente la cohésion.
- Facilite le démoulage immédiat.

- Amélioration de la stabilité du béton mais un réducteur d'eau est nécessaire pour
- compenser l'eau de mouillage supplémentaire.

II.4.4.4. Influence du filler sur l'état durci :

Il est montré que l'utilisation de filler permet l'amélioration des résistances mécaniques des mélanges cimentaires (pâte, mortier, béton). Cet effet positif dépend fortement du dosage en filler et le maximum de résistance est généralement atteint avec un taux de substitution 10% . Au-delà, l'effet du filler n'entraîne pas de modification des résistances ou alors entraîne une diminution. Une augmentation de la finesse du filler permet d'améliorer les résistances des mélanges cimentaires sur mortier. Cette influence positive du filler sur les résistances mécaniques des bétons peut être expliquée par deux phénomènes. Tout d'abord, l'ajout de filler fin permet d'améliorer la densité de la matrice générale du béton et plus spécifiquement de la zone de transition pâte-granulats.

D'un autre côté, bien que qualifié d'addition inerte, le filler calcaire influe sur l'hydratation du ciment en servant de site de nucléation mais également en modifiant les produits d'hydratation formés .

En effet Bonavetti et al montrent que dans une pâte de ciment contenant du filler calcaire, les analyses DRX mettent en évidence trois phases :

- de 1 à 7 jours, formation de carboaluminate hydraté, d'ettringite et diminution de la quantité de CaCO_3 .

de 7 à 28 jours, transformation de l'ettringite en aluminate hydraté ; stabilisation de la formation de carboaluminate hydraté. après 28 jours, l'excès d'ions carbonate en solution entraîne la transformation du sulfoaluminate hydraté en carboaluminate hydraté (plus stable ; l'augmentation des sulfates en solution entraîne la reconversion de sulfoaluminate hydraté en ettringite. La formation de carboaluminate est également détectée lors de la formulation de mortier contenant des granulats calcaires. En effet, on peut observer à la surface des granulats des figures d'attaque.

L'intensité de l'attaque des granulats calcaires par le sulfoaluminate hydraté dépend de la nature du granulat, de l'orientation cristallographique des grains de calcite et de la quantité de sulfoaluminate hydraté présent (c'est-à-dire de la température de cure et du rapport Eau/Ciment).

Les fillers calcaires accélèrent le degré d'hydratation du ciment et de ce fait l'action positive du filler sur les résistances est essentiellement marquée en ce qui concerne les

Résistances au jeune âge (entre 1 et 7 jours) et à tendance à être négligeable au long terme.

II.5. Caractéristiques du BCR :

- Un BCR optimal devrait comporter à peu près la quantité de pâte nécessaire pour remplir les vides du squelette granulaire et pour obtenir la maniabilité désirée Pas assez de pâte : Faibles propriétés mécaniques, maniabilité trop faible, durabilité plus faible
- Trop de pâte : Meilleures propriétés mécaniques, maniabilité trop élevée, coût de Production plus élevé
- Toutes les propriétés des BCR sont étroitement liées au degré de compactage

Un BCR parfaitement compacté devrait avoir une résistance à la compression comparable à celle d'un béton conventionnel de même rapport E/L.

II.6. Propriétés mécaniques et physiques du BCR :

Les propriétés du B.C.R dépendent directement de la qualité des matériaux utilisés, des Proportions du mélange et du degré de compaction ou de consolidation, les propriétés élastiques et thermiques du B.C.R sont similaires à celle d'un béton conventionnel fabriqué à partir des mêmes constituants.

II.6.1 Résistance à la compression :

La résistance à la compression est surtout fonction de la quantité des matériaux cimentaires, des propriétés des granulats, des degrés de compaction, et de la teneur en eau. La relation entre la résistance à la compression et le rapport eau / liant d'un béton conventionnel reste varier pour le B.C.R formulé avec un volume de pâte excédant le volume des vides inters granulaires ne sont que partiellement remplis par la pâte.

La résistance à la compression à 28 jours et 91 jours varie très peu d'un mélange à un autre et augmente de 12% à 30%, selon le cas, cette faible augmentation de résistance montre que le comportement des B.C.R étudié, ressemble plus au comportement d'un béton conventionnel, qui à celui d'un sol s'applique par le volume de pâte élevé incorporé dans les B.C.R (mélange riche en liant), De plus on sait que le B.C.R est un béton de masse dont la résistance à la compression dépend surtout de sa teneur en matière cimentaire et de son rapport eau /liant (M. BARKOUNE, 2011).

II.6.2. Résistance à la traction :

La résistance à la traction du B.C.R mesure avec l'essai brésilien représente approximativement de 12% à 14 % de sa résistance à la compression. La résistance à la traction du B.C.R peut donc varier considérablement d'un mélange à un autre, la variabilité de l'essai est plus grande dans le cas du B.C.R que dans le cas de béton conventionnel.

I.6.3. Résistance au cisaillement :

La construction des barrages en B.C.R consiste à appliquer plusieurs couches horizontales successives, dont l'épaisseur varie de 30 cm à 60 cm. Pour le concepteur la résistance au cisaillement à l'interface entre deux couches est plus importante que la résistance au cisaillement propre des matériaux, dans ce sens les concepteurs choisissent généralement d'augmenter le plus possible le rapport pâte /mortier afin d'assurer une meilleure adhérence inter couches et de diminuer les infiltrations à travers le barrage au service. La résistance au cisaillement du B.C.R dépend de sa cohésion et de son angle de frottement interne .La résistance minimale est généralement mesurée au niveau des joints de constructions et le long d'interface entre les couches successives de B.C.R.

II.6.4. Résistance à la flexion :

L'un des premiers paramètres à prendre en considération lors de la conception d'un revêtement en BCR est la résistance à la flexion (module de rupture) du béton.

Typiquement un mélange de BCR correctement formulé, fabriqué avec 250kg/m³ de ciment type 10E-FS et d'un rapport eau/liant de 0.40 développe généralement une résistance moyenne à la flexion d'environ 4.0 à 4.5 MPa après 3 jours de durcissement, d'environ 5.0 MPa à 7 jours et entre 5.5 et 6.0 MPa à 28 jours. De même, un mélange de BCR fabriqué avec une teneur en ciment d'environ 300kg/m³ et possède un rapport eau/liant d'environ 0.35 développe généralement une résistance moyenne à la flexion d'environ 4 à 4.5 MPa après 3 jours de durcissement d'environ 5.5 à 6.5 MPa à 7 jours et d'environ 7 MPa à 28 jours.

II.7. Section de test du BCR

Avant que le pavé en BCR soit construit, une section d'essai est souvent une exigence qui garantit la résistance et la durabilité de la mixture de BCR et de la manière utilisée. C'est d'habitude une petite section de 4 m par 9 à 15 m de pavé est construite près du site d'emploi. La connaissance qu'un BCR peut être revêtu, curé et ouvert pour la circulation dans quelques heures, cette section d'essai peut être construite quelques jours avant l'emploi réel, pour garantir que les résistances à la flexion et compression sont gagnées. Les figures II.3 et II.4 montrent des éprouvettes extraites d'une section d'essai dans Alabama Vance à l'usine de Mercedes aux Etats Unis.



Figure II .3 .Carottage des éprouvettes de BCR

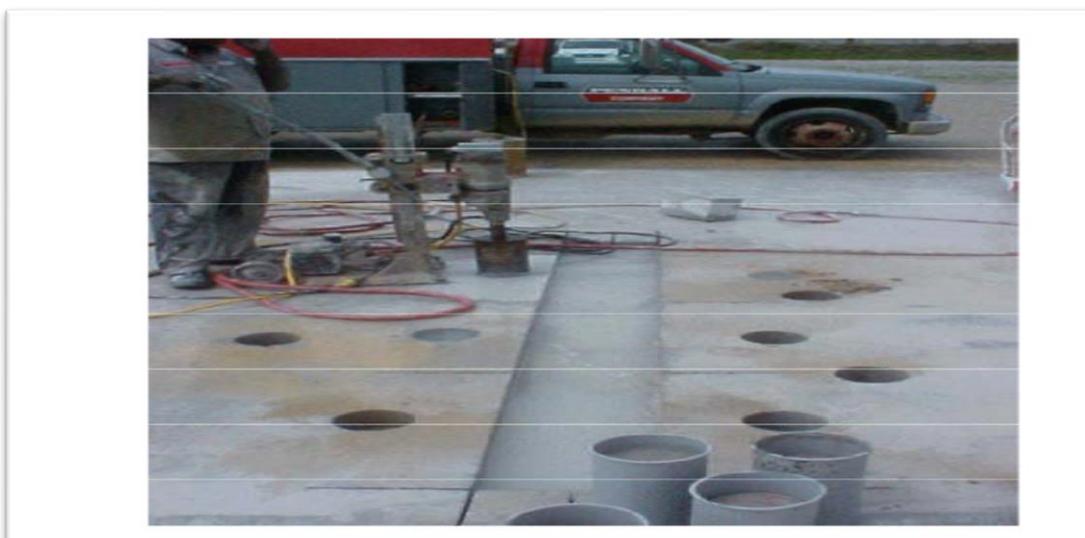


Figure II.4 Carottage des éprouvettes cylindriques de BCR

II.8. Préparation et mise en place du BCR :

On déterminera la recette du béton au moyen d'essais de convenance ; il s'agit de l'optimiser de telle sorte qu'il se prête bien au compactage au moyen des engins disponible (finisseuse et rouleau), ne subisse pas de ségrégation et offre une stabilité du béton frais suffisante pour pouvoir être passé au rouleau sans tarder.

C'est ainsi que la masse totale de fines inertes $< 0,25$ mm (farines et sable fin) devrait atteindre environ 500 kg/m^3 de béton compacté.

On veillera aussi à ce que la part de sable soit suffisante

Compter tenu de sa finesse.

Pour obtenir une surface du béton bien fermée (sans bullage).

Le béton doit être malaxé en centrale, pendant 60 secondes au moins. Durant le transport et les attentes éventuelles, il faudra protéger le béton frais en fonction des conditions météorologiques. Le transport, la mise en place et le compactage doivent être planifiés de telle sorte que la dernière de ces opérations soit achevée au plus tard 90 minutes après le gâchage. La mise en place se fait de préférence au moyen d'une finisseuse équipée d'une poutre à haut pouvoir de compactage et d'un dispositif de nivellement automatique. Pour parvenir finalement à une densité selon l'essai Proctor modifié de 96% au moins, on passera le béton au rouleau lisse de 8 t, d'abord deux fois sans vibrer, puis plusieurs fois en vibrant. S'il s'agit d'une couche de roulement, on passera encore un rouleau à pneus (15 t), afin d'obtenir une surface bien fermée, puis encore une fois un rouleau lisse, sans vibrer, afin de bien lisser la surface.

Si la surface est importante, la mise en place du béton devra se faire au moyen de finisseuses opérant de manière décalée, de manière à ce que le bord de telle dalle soit encore frais lorsqu'on y accolera la dalle voisine et qu'ainsi le compactage puisse se faire en passant le rouleau sur les deux bords à la fois.

On n'a pas exigé du BCR qu'il offre «une résistance élevée au gel et au sel de déverglaçage». Dans les 3 tronçons d'essai du réseau des routes fédérales (D), le béton compacté a été revêtu d'un tapis hydrocarboné, afin de parvenir à la planéité requise. Pour les routes industrielles, les aires de dépôt du secteur militaire et les voies rurales, qui ne sont pas dotées d'un tel revêtement, le sel de déverglaçage pourrait poser un problème. Mais dans ces cas, on a constaté que la résistance élevée (B 35), la teneur en ciment (au minimum 270 kg/m³) et le compactage conduisant à une densité Proctor supérieure à 95% assuraient une résistance suffisante au gel et au sel de déverglaçage.

Les cendres volantes peuvent se révéler contre-productives.



Figure II-5 : mise en place du BCR

II.9. Cure du BCR :

En raison de la faible teneur en eau du BCR, une cure soignée s'impose, immédiatement après le compactage. Afin d'éviter un délavage à la surface fraîchement compactée, l'eau ne doit être, au début, que finement vaporisée. La cure par aspersion d'eau doit durer au moins trois jours.



Figure II-6 : Cure du béton par arrosages ciblés.

II.10. Applications du BCR en technique routière :

Par définition, le BCR pour pavages tient son nom de la technique de compactage employée pour son serrage et sa densification. Les chercheurs expliquent la différence entre les techniques de BCR en barrage et pavages par le fait que les procédures pour la construction d'un pavage en BCR exigent des contrôles plus rigoureux que dans le cas des barrages. Les techniques de mise en oeuvre utilisent, pour l'épandage, le même matériel utilisé pour les revêtements en Béton Bitumineux (BB) à haute densité. Le mélange employé est raide et ferme et il faut le

compacter à l'aide de rouleaux compacteurs cylindriques ou pneumatiques. De plus, une fois durci, La résistance à la compression du BCR pour pavage varie de 15 à 40 MPa. L'utilisation du BCR pour les pavages varie d'une épaisseur de 100 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour les rues des villes, les aires de stationnement de camions et les halls d'entrepôts. Pour résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse, la dimension maximum du granulat est limitée à 20mm.

Du point de vue durabilité, le revêtement en BCR a montré des bonnes performances. Ces Meilleures caractéristiques font de ce matériau un revêtement économique permettant une mise en oeuvre rapide et simple. Il est particulièrement utilisé sur les routes urbaines, les intersections à fort trafic et les voie d'accès fortement sollicitées par les véhicules lourds ainsi que les halls industriels, les voies d'autobus, les ports et les aires de stockages, etc. Les concepteurs ont recours à l'utilisation de ce matériau dans les chaussées lorsque des considérations telle que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes.

Pour améliorer le comportement de la chaussée, la dalle de BCR peut être posée sur une base stabilisée au ciment, appelée aussi fondation stabilisée au ciment et qui est un mélange compacté de granulats et de ciment dont ils forment une excellente fondation de route. Cette fondation contribue au renforcement de la structure et fournit une plateforme résistante pour supporter une dalle de BCR et permet aussi une optimisation économique de l'épaisseur.

II.11. BCR et béton conventionnel :

Il existe plusieurs différences structurales importantes entre le béton compacté au rouleau et le béton conventionnel. Ce sont justement ces différences, dont l'influence sur certaines propriétés est encore mal connue, qui limitent encore de nos jours son utilisation. Dans un béton normal, la quantité de pâte de ciment, les hydrates et les capillaires qui contiennent l'eau gelable sont bien répartis dans la pâte. Ces bétons. Même s'ils ne contiennent pas d'air entraîné, comportent toujours un peu d'air occlus qui se retrouve sous forme de bulles sphériques bien dispersées dans la matrice.

La structure d'un béton compacté au rouleau est partiellement différente. Pour les BCR, qui contiennent moins de pâte que les bétons conventionnels, les caractéristiques rhéologiques et la consistance globale du mélange font en sorte que la consolidation du matériau nécessite un apport d'énergie de serrage externe, généralement à l'aide de rouleaux vibreurs. Il est impossible d'évaluer correctement les caractéristiques rhéologiques des BCR avec les techniques usuelles, et l'on emploie normalement un appareil de type Vébé. Cet appareil permet la mesure du temps requis pour consolider par vibration le béton frais dans un moule cylindrique

(une surcharge étant appliquée sur le béton frais). Le faible volume de pâte des BCR a deux conséquences principales sur la structure interne du matériau durci. D'abord, la pâte risque d'être moins homogène que dans les bétons conventionnels. En effet, la consistance du matériau rend difficile la distribution uniforme de l'eau lors du gâchage. De plus, les BCR contiennent toujours un certain nombre des vides de compactage (Figure 13). Ces vides d'air, qui sont généralement dus à une consolidation incomplète du matériau, ont des formes et volumes variables. Ils se distinguent des bulles d'air (sphériques) par leur forme irrégulière. Si la formulation du mélange est inadéquate, ou la consolidation insuffisante, il se peut que La quantité de vides de compactage dans le béton durci soit très élevée et, à la limite, que ces vides soient interconnectés.

On considère souvent le BCR comme étant un empilement granulaire, avec juste assez de pâte pour assurer un enrobage complet des granulats. Il est par conséquent facile de concevoir que plus l'empilement des particules solides sera compact, moins le volume de pâte nécessaire pour bien les enrober sera important. Une bonne formulation des KR, particulièrement en ce qui antrait à la granulométrie des granulats, est donc très importante.

Par suite de la moindre homogénéité de la pâte, les BCR sont généralement plus perméables que les bétons conventionnels. D'une part, ceci a pour effet, lors du gel, de faciliter le mouvement de l'eau dans la pâte vers les vides d'air. Mais, d'autre part, la présence de zones de plus forte porosité peut rendre le matériau plus susceptible de se détériorer s'il est soumis à des cycles de gel-dégel.

II.12. Avantages et inconvénient du BCR :

II.12.1. Avantages du BCR :

Les avantages du BCR sont résumés dans les points suivants :

- La durabilité: L'un des avantages les mieux connus du béton est sa durabilité. Cette durabilité mène à une réduction des travaux de construction et d'entretien qui entravent la circulation [5].
- Moins de travaux d'entretien: Les routes asphaltées exigent en général des travaux d'entretien tous les trois à cinq ans en comparaison à 12 ans pour des travaux d'entretien mineurs aux routes en béton.
- Moins de déformation: Vu la souplesse du revêtement en asphalte, les véhicules de fort tonnage peuvent finir par y creuser des ornières. La poussée qu'ils exercent sur le revêtement peut aussi, à long terme, le faire plisser et lui donner l'apparence d'une tôle

ondulée. La rigidité du béton empêche toutefois ce genre de déformations de se produire. D'autre part le béton ne se déforme pas sous l'effet de la chaleur.

- Une meilleure adhérence: Les études ont démontré que le béton assure, dans l'ensemble,
 - Une meilleure adhérence et une distance d'arrêt plus courte que l'asphalte, surtout lorsque le revêtement est mouillé et comporte des ornières.
 - Des économies de carburant (jusqu'à 20 %): La chaussée souple fléchit davantage que la chaussée rigide sous l'effet des poids lourds. Ce qui mène à supposer qu'il faut plus de carburant, pour rouler sur une chaussée souple. La rigidité de la chaussée en béton réduit la déflexion et diminue ainsi la consommation de carburant.
 - Une meilleure visibilité la nuit: La chaussée en BCR assure une meilleure visibilité la nuit. Comme le béton est de couleur claire, il réfléchit mieux la lumière des phares et des lampadaires que l'asphalte, qui est foncé. Autrement dit, il y a plus de lumière visible.

II.12.2. Inconvénients du BCR :

Le BCR présente plusieurs avantages mais comme tous les matériaux il a des inconvénients :

- La texture rugueuse.
- Qualité des parements.
- Difficulté d'entraîner de l'air.

Coût de transport des matières cimentaires en régions éloignées. Dans les grands projets de construction en BCR. On utilise de plus en plus des installations de production en continu (similaires à celles utilisées pour les enrobés bitumineux) qui ont des taux de production beaucoup plus importants.

II.13. Méthodes de formulation :

Vu la spécificité du BCR comme un béton à affaissement nul, très ferme, qui contient une grande quantité de granulats et une faible teneur en ciment, les méthodes classiques de formulation du béton ne sont pas applicables directement sur le BCR.

Le rapport ACI 325 présente deux procédures pour la formulation des mélanges de BCR destinés au corps routier. La première est basée sur la recherche d'une limite de maniabilité alors que la seconde repose sur le principe de définir l'état le plus dense du mélange utilisant les concepts de la Géotechnique. Les deux méthodes, peuvent être utilisées séparément pour les routes et pour les barrages.

II.13.1. Méthode basée sur les limites de maniabilité :

Cette méthode consiste à déterminer les proportions du mélange de telle sorte à atteindre une maniabilité optimale qui peut satisfaire aux exigences techniques. La maniabilité du béton est mesurée à l'aide de l'appareil Vébé. Elle est exprimée en secondes. La procédure de formulation est composée de plusieurs étapes : détermination du volume de pâte minimal, choix du rapport eau/liant et enfin l'ajustement des proportions de granulats.

Dans la première étape, une série de mélanges de mortiers est préparée à différents rapports eau/ciment et à différents rapports sable/ciment sont étudiés, afin de déterminer le volume de pâte minimum. Pour chaque rapport eau/sable des mélanges sont préparés à différents rapports eau/ciment et la masse volumique est mesurée.

La deuxième étape consiste en la détermination des caractéristiques mécaniques des mélanges correspondants aux masses volumiques optimales (à différents rapports E/C). Le choix du rapport eau/ciment est fait selon les propriétés mécaniques requises. La troisième étape consiste à optimiser des granulats fins et grossiers selon la maniabilité voulue.

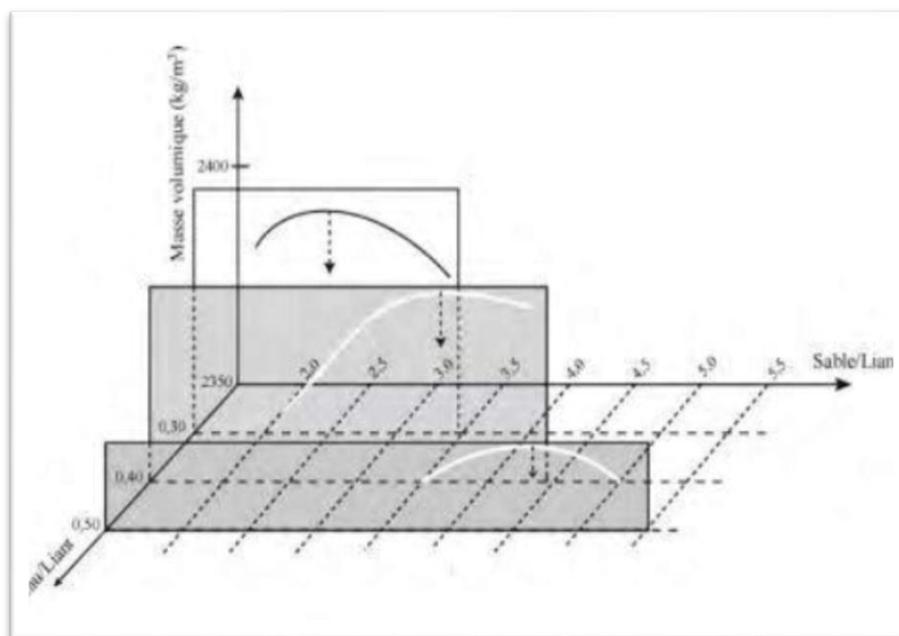


Figure II-7 : Détermination du volume de pâte minimal (Gauthier & Marchand.2001)

II.13.2. Méthode basée sur les paramètres de la Géotechnique :

Dans cette méthode, le principe de la détermination des différentes proportions est basé sur le concept de compactage des sols en laboratoire. Elle consiste à utiliser l'essai Proctor modifié,

Suivant le mode opératoire de la norme ASTM D1557, afin d'obtenir la relation de la variation de la densité en fonction de la teneur en eau.

La teneur en ciment est déterminée selon les caractéristiques mécaniques exigées, généralement entre 200 et 350 kg/m³. Tandis que, la teneur en eau optimale est estimée sur la base des essais de compactage du béton frais.

Cette méthode est plus appropriée lorsque des granulats de petites dimensions sont utilisés et lorsqu'une forte teneur en matériaux cimentaires est utilisée, ce que l'on trouve généralement avec les mélanges de BCR destinés aux projets routiers (Marchand et al, 1997 ; Gauthier & Marchand, 2001). Les proportions en granulats fins et grossiers sont déterminées par rapport à un fuseau granulométrique. Puis une série de mélanges du béton est préparée variant chaque fois la teneur en matériaux cimentaires, entre 12 et 14 % de la masse totale des matériaux secs. Pour chacune des teneurs en liant, des éprouvettes sont préparées à différentes teneurs en eau puis compactées dans le moule Proctor modifié à une énergie spécifique. Les éprouvettes sont fabriquées en cinq couches d'égale épaisseur et compactées de la même manière (56 coups par couche). La masse volumique du moule compacté est ensuite mesurée et la densité sèche est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Pd = 100 * \omega * Ph / (100 + \omega)$$

Pd : densité sèche.

Ph : densité humide maximale mesurée.

ω : teneur en eau réelle (la teneur en moyenne calculée à partir des pesées de prélèvement de béton frais, avant et après étuvage).

La variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en eau du mélange est tracée dans un graphique. La teneur en eau correspondant à la densité sèche maximale (sommet de la courbe) représente la teneur en eau optimale. Des essais de résistance en compression sont réalisés sur des éprouvettes préparées à différentes teneurs en eau optimales. Le mélange ayant la teneur en liant minimale et possédant les propriétés mécaniques requises est alors choisi (Marchand et al, 1997).

L'expérience en chantier a montré que, généralement, la différence d'épaisseur entre la couche de BCR à la sortie du finisseur et la couche de BCR compactée par un rouleau compacteur tandem à cylindres métalliques lisses est de l'ordre de 10 à 25 %, selon le type de finisseur.

II.14. Compactage du BCR :**II.14.1. Matériels de compactage :**

Pour le compactage, utiliser des rouleaux compacteur tandems à cylindre d'acier lisses pouvant être utilisé en mode statique et vibratoire.

Pour le finissage des surfaces sans couche de roulement, utiliser un rouleau compacteur Polyvalent (rouleau vibrant d'acier en avant en arrière).



Figure II-8 : rouleaux compacteurs tandems à cylindres d'acier lisse



Figure II-9 : rouleau pneumatique bomage

II.14.2. Opération de compactage :

Le degré de compactage du BCR à l'état frais influence ses propriétés à l'état durci et notamment sa résistance à la flexion.

Le compactage consiste en deux passes (on entend par une passe, un cycle complet en avant et en arrière) du compacteur à rouleau sans vibration pour consolider les matériaux, suivis de quelques passes avec vibration, généralement 4 ou plus, jusqu'à l'obtention de la compacité spécifiée. Le processus de compactage est complété par quelques passes de l'engin à pneus pour fermer les éventuels vides ou les petites fissures superficielles. A défaut d'un compacteur à pneus, on peut donner quelques passes finales du compacteur à rouleau sans vibration pour fermer la surface.

Le compactage des bords est aussi une question délicate. Pour obtenir de bons résultats, il est nécessaire de les épauler avec des matériaux stables placés à l'avance, comme par exemple les bordures en zone urbaine ; sinon, des pertes importantes de compacité et de résistance se produisent.

Les opérations de compactage doivent débuter au maximum 10 minutes après la mise en place du BCR, et la durée maximale est de 60 minutes mesurée à partir du malaxage en centrale.

En tout temps lors des opérations de compactage, la surface du BCR doit être maintenue constamment humide par la vaporisation d'eau en bruine.

II 15. CONCLUSION

Les avantages précités, tel que la durabilité (moins d'entretien) et la résistance du BCR, appuyés aussi par des études de formulation, de résistance et d'une évaluation économique montre que le BCR est un matériau très convenable et rentable pour la construction et l'entretien des routes et des voies fortement sollicités

Le revêtement est mis en place à l'aide des mêmes engins utilisés en travaux publics et cette Opération requiert une certaine dextérité. Toutefois, la bonne organisation de chantier reste une condition nécessaire de la réussite d'un projet de BCR.

Chapitre III
Caractéristiques des Matériaux

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents matériaux utilisés pour la confection de notre BCR. Nous avons travaillé avec des granulats (sable 0/1 correction, sable 0/3 concassé, gravier 3/8 et 8/15) provenant de la carrière sidi Ali Benyoube wilaya de SIDI BEL ABBES. Le ciment est de classe 32.5 N (Chamil) de la cimenterie d'Oggaz (Mascara).

Les essais de caractérisation ont été effectués au niveau du Laboratoire privée, selon un programme d'essais réalisé conformément aux normes en vigueur. Ils se résument à : l'analyse granulométrique, équivalent de sable, module finesse, coefficient d'absorption d'eau et la masse volumique (apparente et absolue).

III.2 Caractéristiques des matériaux**III.2.1 Eau de gâchage**

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. L'eau d'hydratation est la quantité d'eau absorbée par le liant (ciment; chaux etc.). Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant ; le mouillage des granulats et la facilité de mise en œuvre du béton. Pour le BCR, la quantité d'eau utilisée pour le gâchage représente généralement 4,5 et 6% de la masse totale des constituants secs.

La quantité d'eau nécessaire pour le gâchage est déterminée généralement empiriquement pour atteindre la densité maximale.

III.2.2 les graviers

Le choix du type de granulats basé sur le diamètre, dépend essentiellement des exigences techniques liées à la résistance, la durabilité et de la disponibilité des matériaux. Pour un mélange de BCR, il est important de limiter le diamètre maximal nominal de granulats grossiers afin de minimiser le risque de ségrégation et de faciliter les conditions de mise en œuvre. Selon la destination du projet, le diamètre maximal de granulats est limité généralement, à 20mm pour les projets routiers et à 50 mm pour les barrages.

On a choisi les agrégats, constitués de sable et de gravillons, de façon que la courbe granulométrique de l'ensemble de proportions employées soit optimum

On a opté dans notre étude pour les fractions granulaires (3/8).et (8/15), et sable 0/3 de la carrière de Sidi Ali Beyoube (Sidi Belabes).

III.2.2.1 Analyse granulométrique selon la norme (NP EN 933-1)

Utilisation de La quantité des graviers doit répondre aux différents impératifs qui sont opposés, d'où, il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif, au même temps, il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants. Pratiquement, la masse utilisée doit répondre au critère suivant :

$M \geq 0,2D_{\max}$ D_{\max} : Diamètre maximal du gros granulat en (mm) ;

M : la masse de l'échantillon en (kg Plus de détaille à chapitre suivant.



Figure III.1: essai granulométrie des granulats

Les résultats de l'analyse granulométrique du **gravier (3/8 mm)**

Tableau : Analyse granulométrique du gravier (3/8 utilisé)

Masse sèche totale: $M_1(g) = 3000g$

Masse sèche après le lavage (> 63 mm): $M_2 (g) = 2970g$

Masse totale de matériau inférieure à $0,063$ mm: $P (g) = 30g$

Tableau III.1. Résultats de l'analyse granulométrique du sable 3/8

TAMIS MAILLE (mm)	Masse Retenue (kg)	Matériau Retenu (%)	Matériau Passé (%)
25,0	0,00	0,0	100
20,0	0,00	0,0	100
16,00	0,00	0,0	100
12,50	0,00	0,0	100
10,00	0,00	0,0	100
8,00	65,00	2,2	98
6,30	679,00	22,6	75
4,00	1661,00	55,4	20
2,00	450,00	15,0	5
1,000	76,00	2,5	2
0,500	29,00	1,0	1
0,250	0,00	0,0	1
0,125	0,00	0,0	1
0,063	10,00	0,3	1
Restant au fond	0,00	0,0	1
Matériau fin total			1,0%

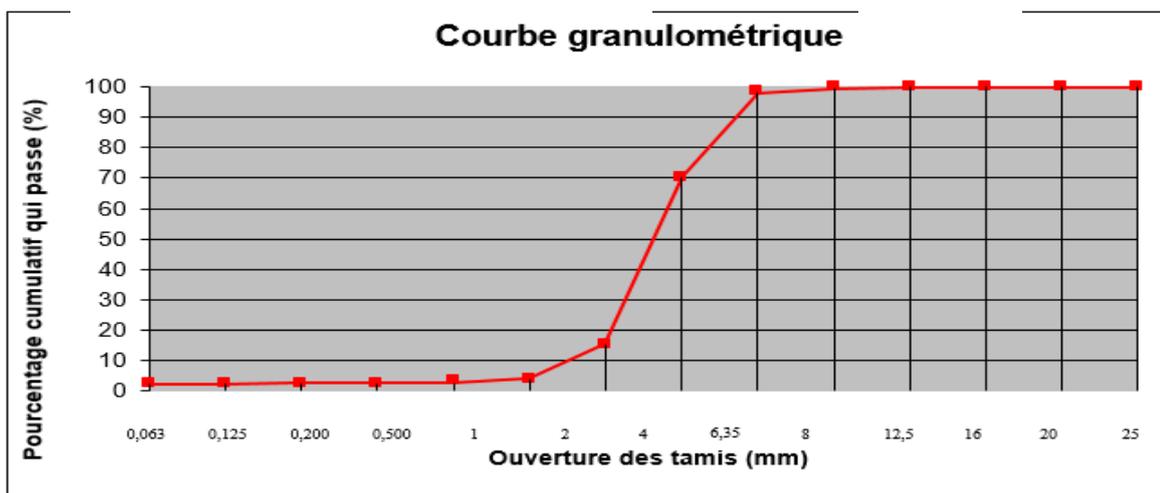


Figure III.2 : Courbe granulométrique du gravier (3/8) utilisé

Les résultats de l'analyse granulométrique du **gravier (8/15 mm)**

Tableau : Analyse granulométrique du gravier (8/15 utilisé)

Masse sèche totale: M1(g) = 5000g

Masse sèche après le lavage (> 63 mm): M2 (g) = 4975g

Masse totale de matériau inférieure à 0,063 mm: P (g)= 40g

Tableau III.2.: Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15

TAMIS MAILLE (mm)	Masse Retenue (kg)	Matériau Retenu (%)	Matériau Passé (%)
25,0	0,00	0,0	100
20,0	0,00	0,0	100
16,00	300,00	6,0	94
12,50	1634,00	32,7	61
10,00	2125,00	42,5	19
8,00	400,00	8,0	11
6,30	255,00	5,1	6
4,00	180,00	3,6	2
2,00	76,00	1,5	1
1,000	0,00	0,0	1
0,500	0,00	0,0	1
0,250	0,00	0,0	1
0,125	0,00	0,0	1
0,063	0,00	0,0	1
Restant au fond	15,00	0,3	1

Matériau fin total	0,8%
---------------------------	-------------

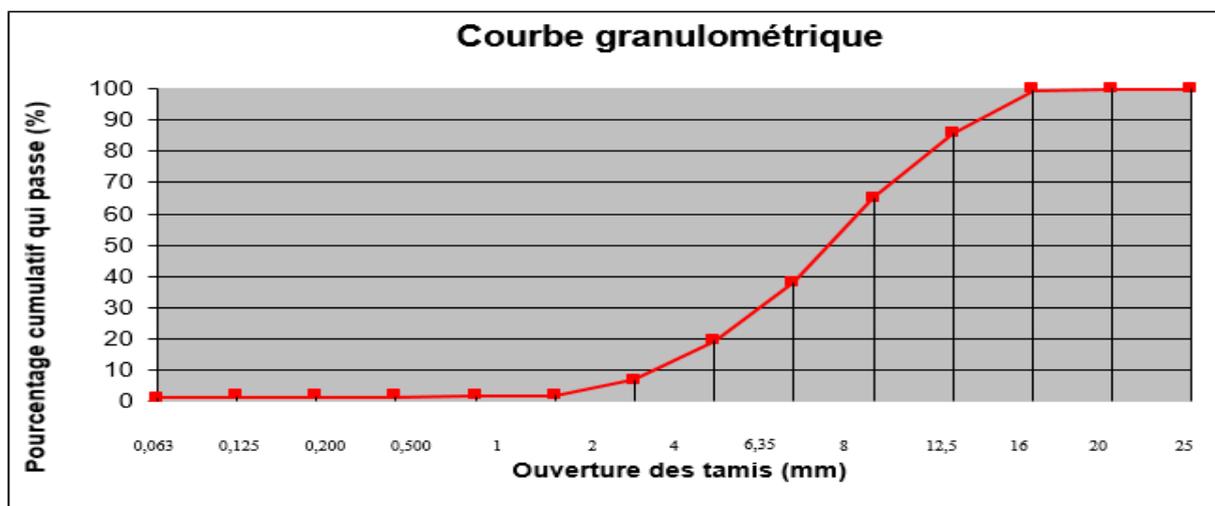


Figure III.3 : Courbe granulométrique du gravier (8/15) utilisé

III.2.2.2 Masse volumique réelle, masse volumique apparente et Coefficient D'absorption d'eau selon la norme (NF EN 1097-6)

La masse est déterminée en pesant la prise d'essai saturée surface sèche et de nouveau après séchage à l'étuve, La masse volumique réelle se calcule à partir du rapport masse/volume. Le volume est calculé à partir de la masse du volume d'eau déplacé, déterminée soit par réduction du poids, selon la méthode du panier en treillis ou par pesée, selon la méthode au pycnomètre.



Fig. III.4 : Etuve à 105° C



Fig. III.5 : les bacs remplis des granulats



Figure III.6 : Chiffons absorbant, doux et secs



Figure III.7: Éprouvette cubique

Gravier	3/8	8/15
Masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air : M1 (g)	932.6	1936
Masse dans l'eau du panier contenant l'échantillon de granulats saturés : M2 (g)	1349.9	2015
Masse dans l'eau du panier vide : M3 (g)	797.7	816
Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air : M4 (g)	918.3	1920
$\rho_a = M4 / (M4 - (M2 - M3))$	2.59	2.66
$\rho_{rd} = M4 / (M1 - (M2 - M3))$	2.41	2.60
$\rho_{ssd} = M1 / (M1 - (M2 - M3))$	2.45	2.63

Tableau III.3 : Masse volumique réelle, Masse volumique apparente des graviers 3/8 et 8/15

III.2.2.3 Porosité

L'essai consiste à déterminer la masse de l'échantillon à l'état sec et saturé en eau distillée par immersion pendant 24 heures, la porosité accessible à l'eau de l'échantillon sec E (%) et déterminer par l'équation suivante

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{P_{solu} \cdot V_{éch}} \quad \dots \text{(équa): III.1}$$

M sat : masse de l'éprouvette à l'état saturé

M sec : masse de l'éprouvette à l'état sec

V : volume de l'échantillon

P : masse volumique de la solution

III.2.2.4 Coefficient d'aplatissement selon la norme (NF EN 933-3)

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

Le coefficient d'aplatissement s'obtient en faisant une double analyse granulométrique, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulat.

Les notations suivantes sont utilisées

R_i = masse de chaque classe granulaire d_i/D_i , en grammes

$M_1 = \sum R_i$ ce chiffre peut être légèrement inférieure à M_0 mais ne doit pas s'en écarter de plus de (2%)

M_i = masse des éléments de chaque classe granulaire d_i/D_i passant sur la grille $M_2 = \sum m_i$

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$Ai = \frac{mi}{Ri} \times 100 \dots (\text{équa}) : \text{III.2}$$

III.2.2.5 L'essai Los Angeles sur gravier 8/15 selon la norme (NF P 18-573)

Classe granulométrique	Nombre de Boulet	Masse d'échantillon(M)	Masse d'échantillon après lavage (m)	$LA = \frac{M-m}{M} * 100$
10/14	11	5000	3787	24.26

Tableau III.4 : résultats de l'essai los Angeles de gravier 8/15

III.2.2.6 L'absorption

	8/15	3/8
Masse saturé superficielle Sec	5000	3000
Masse sèche	4972.5	2981.7
Absorption	0.55	0.61

Tableau III.5 : résultat l'absorption des graviers 3/8 et 8/15

Les caractéristiques physico-mécanique de Gravillon 3/8 et 8/15 sont résumées dans le tableau suivant :

Caractéristique	3/8	8/15
Masse volumique absolue g/cm ³	2.59	2.66
Masse volumique apparente g/cm ³	1.47	1.46
Los Anglos%	/	24.26
Absorption%	0.55	0.61
Porosité%	1.58	1.57
Coefficient d'aplatissement %	/	7.83

Tableau III.6 : caractéristique physico-mécanique du gravier 8/15 et 3/8

III.2.3 sable

Dans notre étude pour le sable il en existe deux types de sable

Sable 0/1 (ras el ma) pour correction et sable 0/3 concassée (sidi ali benyoube) pour rendre la composition homogène

III.2.3.1 Analyse granulométrique selon la (NP EN 933-1)

Les résultats de l'analyse granulométrique du **sable (0/1 mm)**

Tableau : Analyse granulométrique du sable (0/1 utilisé)

Masse sèche totale: $M1(g) = 1000g$

Masse sèche après le lavage ($> 63 \text{ mm}$): $M2 (g) = 980g$

Masse totale de matériau inférieure à $0,063 \text{ mm}$: $P (g) = 26g$

Tableau III.7 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable 0/1

TAMIS MAILLE (mm)	Masse Retenue (kg)	Matériau Retenu (%)	Matériau Passé (%)
25,0	0,00	0,0	100
20,0	0,00	0,0	100
16,00	0,00	0,0	100
12,50	0,00	0,0	100
10,00	0,00	0,0	100
8,00	0,00	0,0	100
6,30	0,00	0,0	100
4,00	0,00	0,0	100
2,00	12,00	1,2	99
1,000	28,00	2,8	96
0,500	203,00	20,3	76
0,250	397,00	39,7	36
0,125	327,00	32,7	3
0,063	13,00	1,3	3
Restant au fond	6,00	0,6	3
Matériau fin total			2,6%

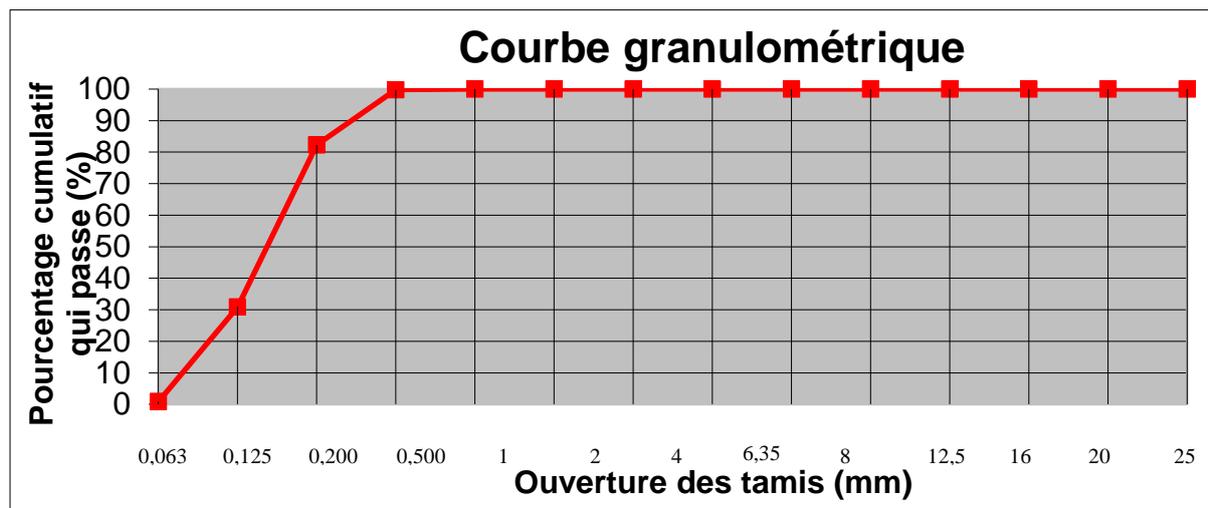


Figure III.8 : Courbe granulométrique du sable (0/1) utilisé

Les résultats de l'analyse granulométrique du **sable (0/3 mm)**

Tableau : Analyse granulométrique du **sable (0/3 utilisé)**

Masse sèche totale: $M1(g) = 1500g$

Masse sèche après le lavage ($> 63 \text{ mm}$): $M2 (g) = 1465g$

Masse totale de matériau inférieure à $0,063 \text{ mm}$: $P (g) = 45g$

Tableau III.8 : Résultats d'analyse granulométrique du sable 0/3

TAMIS MAILLE (mm)	Masse Retenue (kg)	Matériau Retenu (%)	Matériau Passé (%)
25,0	0,00	0,0	100
20,0	0,00	0,0	100
16,00	0,00	0,0	100
12,50	0,00	0,0	100
10,00	0,00	0,0	100
8,00	0,00	0,0	100
6,30	5,00	0,3	100
4,00	120,00	8,0	92
2,00	535,00	35,7	56
1,000	395,00	26,3	30
0,500	215,00	14,3	15
0,250	110,00	7,3	8
0,125	55,00	3,7	4
0,063	20,00	1,3	3
Restant au fond	10,00	0,7	3
Matériau fin total			3,0%

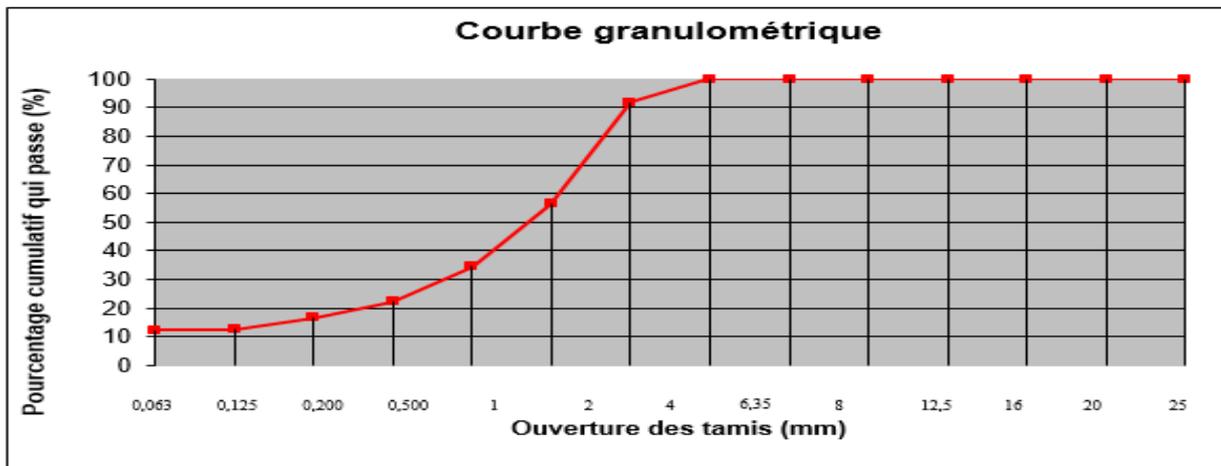


Figure III.9 : Courbe granulométrique du sable (0/3) utilisé. [19]

III.2.3.2 Module de finesse selon la norme (NF EN 13139)

Le module de finesse est calculé par la somme des refus cumulés sur les tamis (4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125) divisée par cent.

III.2.3.2.1 Sable 0/1

Le module de finesse (FM) permet de contrôler la régularité. Le cas échéant, il convient que le module de finesse d'une livraison soit compris dans les limites du FM déclaré 0,25 ou dans d'autres limites spécifiées

$$FM = \frac{\sum \{(>4) + (>2) + (>1) + (>0,5) + (>0,25) + (>0,12)\}}{100}$$

$$FM = \frac{\sum \{(0) + (99) + (96) + (76) + (36) + (3)\}}{100} = 3.1$$

Tableau III.9 : Grosseur ou finesse en fonction du module de finesse

Module de finesse		
GF	MF	FF
3,6 à 2,4	2,8 à 1,5	2,1 à 0,6

Le sable utilisé possède un module de finesse **MF**= 3.10, **MF** < 3.6 ce qui signifie que le Sable utilisé dans notre étude est un sable grand fin.

III.2.3.2 Sable 0/3

Le module de finesse (FM) permet de contrôler la régularité. Le cas échéant, il convient que le module de finesse d'une livraison soit compris dans les limites du FM déclaré 0,25 ou dans d'autres limites spécifiées

$$FM = \frac{\sum \{(>4) + (>2) + (>1) + (>0,5) + (>0,25) + (>0,12)\}}{100}$$
$$FM = \frac{\sum \{(92) + (56) + (30) + (15) + (8) + 4\}}{100} = 2.0$$

Le sable utilisé possède un module de finesse MF= 2.05, MF < 2.1 ce qui signifie que le Sable utilisé dans notre étude est un sable fin.

III.2.3.3 Equivalent de sable selon la norme (NF P 18-598)

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent. La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse Sédimentée, la hauteur totale du flocculant et de la partie sableuse sédimentée



Figure III.10 : Essai équivalent de sable et balance



Figure III.11 : machine d'agitation

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers.

*Les résultats des trois essais effectués sont donnés dans le tableau

N° EP	H1		H2		HP		ESv=H2/H1%		Esp=HP/H1%	
	0/1	0/3	0/1	0/3	0/1	0/3	0/1	0/3	0/1	0/3
1	10.7	12.5	8.8	8.9	8.4	8.4	82.24	71.2	78.50	67.2
2	11.3	12.6	9.3	9.0	8.6	8.6	82.30	69.76	76.10	66.66
3	10.6	12.2	9.2	8.2	8.1	7.9	86.19	66.39	76.41	64.75
Moyenne							83.57	69.12	77.00	66.20

Tableau III.10 : essai équivalent de sable deux type 0/1 et 0/3

III.2.3.4 Masse volumique réelle, Masse volumique apparente et Coefficient d'absorption d'eau selon la norme (NF EN 1097-6) :

Les résultats de masse volumique des sables sur le tableau :

Sable	0/1	0/3
Masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air: M1 (g)	520	865
Masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés: M2 (g)	1779.7	2125.80
Masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement: M3 (g)	1459.3	1588.8
Masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air : M4 (g)	515.6	860.4
$\rho_a = M4 / (M4 - (M2 - M3))$	2.64	2.66
$\rho_{rd} = M4 / (M1 - (M2 - M3))$	2.58	2.62
$\rho_{ssd} = M1 / (M1 - (M2 - M3))$	260	2.63

Tableau III.11 Masse volumique réelle, Masse volumique apparente des sables 0/1 et 0/3

Dont :

ρ_a : la masse volumique absolue.

ρ_{rd} : la masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve.

ρ_{ssd} : Masse volumique saturée à surface sèche.

III.2.3.5 L'absorption

	0/1	0/3
Masse saturé superficielle Sec	1000 g	1500 g
Masse sèche	982.7 g	1459 g
Absorption	1.76 %	2.80 %

Tableau III.12 : Résultats de la mesure de l'absorption des sables 0/1 et 0/3

III.2.3.6 Essai de bleu de méthylène selon la norme (NA 1984)

Tableau III.13. Les résultats de l'essai au Bleu de Méthylène du sable 0/3

Masse sèche de la prise d'essai de la fraction inférieur à 2 mm (g).	M1= 300
Quantité totale de la solution de colorant ajoutée (ml).	V' 1 = 19
Valeur MB, exprimée en gramme de colorant par Kg de grains de fraction 0/2 mm	$MB = (V'1 / M1) \times 10 = 0.63$

Les propriétés physico-chimiques des deux sables sont représentées dans Le Tableau Suivant :

Sable	(0/1)	(0/3)
La masse volumique apparente g/m ³	1.44	1.69
La masse volumique absolue g/m ³	2.64	2.66
Teneur en bleu	0.35	0.63

Tableau III.14 : Propriétés physico-chimiques des sable 0/1et 0/3

III.2.4 Caractérisation du ciment Chamil CPJ – CEM II/B 32,5 N

Le type de ciment utilisé dans cette recherche est le ciment Portland (Chamil) classe 32.5N qui provenant de la cimenterie oggaz wilaya de mascara

Les essais physiques et les analyse chimique ont été effectuée au laboratoire de

Contrôle de qualité de la cimenterie, et les résultats trouvés sont résumés sur le tableau III.15

Tableau III.15 : Les essais physiques sur les ciments

	Ciment 32.5N
Consistance normale (%)	0.26
Début de prise à 20°C(NA230) (min)	(120__200)
Fin de prise (min)	(200__300)
SSB (NA231) (cm ² /g)	4400__5400
Poids spécifique (g/cm ³)	3.11
Retrait à 28j (µm/m)	≤ 1000
B	0.5__2.5

Tableau III.16 : Composition chimique du ciment

Ciment 32.5	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Chlorures	PAF
Composition Chimique	62.10	18.4	4.00	2.1	2.8	0.15	0.64	2.4	0.04	11

Tableau III.17 : Caractéristique mécanique de ciment

Essai	2jours	7jours	28jours
Résistance à la compression (MPa)	≥10	≥16	≥32.5
Résistance à la flexion (MPa)	3	4.3	5.3

Tableau III.18 : Composition minéralogique du ciment

Ciment	C3S %	C3A %
Composition minéralogique %	55 — 64	6 — 8.2

Tableau III.19 : Caractéristiques du ciment CPJ-CEMII 32.5 [2]

La masse spécifique	3.11g/cm ²	
Surface spécifique	4000cm ² /g	
Résistance à la compression	3jours	11.33 Mpa
	7jours	19.2 Mpa
	28jours	35.66 Mpa
Résistance à la traction	3jours	2.35 Mpa
	7jours	3.62 Mpa
	28jours	5.20 Mpa

III.2.4.1 Résistance à la compression

L'écrasement des éprouvettes cylindriques avec un diamètre de 16 cm et une hauteur de 32 cm sur la machine presse à béton ont été surfacées à l'aide du ciment de surfacage, ces derniers ont été centrés entre les deux plateaux sur les faces latérales de moulage, après la mise en marche de l'appareil la charge augmente automatiquement à une vitesse constante et progressivement de 0.5 MPa/s, permettant aux plateaux de comprimer l'éprouvette jusqu'à la rupture l'essai a été réalisé conformément à la norme NFP 18-406.



Figure III.12 : essai de compression

III.2.4.2 Résistance à la traction par fendage

Dans ce cas la résistance à la traction par fendage est réalisée sur trois éprouvettes cylindriques. Cet essai permet de déterminer expérimentalement la résistance en traction du béton. L'essai de fendage est un essai de traction indirect consistant à comprimer radialement l'éprouvette (figure), créant alors des contraintes de traction horizontales au sein du matériau. La traction du matériau doit être plus de trois fois inférieure à sa résistance en compression pour que cet essai permette d'estimer la résistance en traction. C'est le cas pour les bétons ordinaires où le rapport est généralement d'environ dix.



Figure III.13 : essai de traction par fendage

III.2.5 Adjuvant :

Les Adjuvants chimiques couramment utilisés dans le béton conventionnel comme les réducteurs d'eau, les retardateurs, les accélérateurs et super-plastifiants peuvent être incorporés dans les mélanges de BCR. à cause de l'aspect sec du BCR, les adjuvants doivent être ajoutés avec des quantités supérieures à celles utilisées dans le béton classique pour être efficaces [12,13].

III.3 Essais caractéristiques sur BCR

III.3.1 Essai Proctor modifié

Cet essai permet de définir la relation entre la teneur en eau d'un mélange granulaire et sa densité sèche pour une énergie de compactage donnée. L'essai consiste à laisser tomber un marteau plusieurs fois sur un matériau granulaire dans un moule. La masse du marteau (4,5 kg), la hauteur de chute (457 mm), le nombre d'impacts (56) et le nombre de couches (5) sont fixés par la norme. Suite aux opérations de compactage, le moule est arasé puis pesé et la masse volumique humide (ρ_h) du matériau est déterminée. On peut calculer la masse volumique sèche (ρ_d) du mélange à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho_d = \left(\frac{\rho_h}{w+100} \right) 100 \dots (\text{équa}) : \text{III.3}$$

Concernant le compactage du BCR au laboratoire, on a utilisé la méthode de confection par compactage au Proctor modifié

l'optimum de Proctor est la teneur en eau w (w_{opt}) pour laquelle le mélange atteindra pour une énergie de compactage donnée un γ_d maximale ($\gamma_{d\text{max}}$)

La courbe Proctor donnant pour une énergie de compactage donnée (w_{opt}) et ($\gamma_{d\text{max}}$)



Figure III.14 : compactage d'un BCR selon procédé Proctor modifié

III.3.2 Le compactage manuel :

Pour le compactage manuel, il existe deux types d'essais normalisés: l'essai Proctor Normal et l'essai Proctor Modifié. Ils diffèrent par l'énergie de compactage mise en œuvre. Pour compacter le BCR au laboratoire, nous avons utilisé un procédé donnant lieu à une énergie de compactage

assimilable à l'énergie donnée par un rouleau compacteur, c'est l'essai Proctor modifié. L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule de dimension définie avec une dame de poids et de hauteur de chute normalisé un échantillon de BCR à une teneur en eau donnée. On refait l'essai à énergie de compactage fixe avec des différentes teneurs en eau jusqu'à la détermination de l'optimum Proctor.

III.3.3 Le compactage automatique :

Dans cette partie, nous avons utilisé la machine de compactage automatique type "RMU Testing Equipment" qui comporte une dame tombant automatiquement dans un moule, effectuant un compactage équivalent à celui produit par les engins de chantiers courants. Le mouvement de translation verticale automatique de la dame est couplé à un mouvement de rotation du moule autour de son axe. Ce procédé Permet la réparation uniforme de compactage sur la surface du moule. Le compactage au moyen de cette machine correspond à un compactage relativement énergique. On a choisi aussi le moule CBR (California Bearing Ratio Test) pour la confection des éprouvettes dans ce mode de compactage (Fig. 14).

III.3.4. Le Vibro-compactage :

Les rouleaux vibrateurs sont généralement utilisés pour densifier le BCR mis en place en corps de chaussées pour les constructions de route. Et pour modéliser ce type de compactage au laboratoire, nous avons utilisé le mode de Vibro-compactage qui regroupe la combinaison des vibrations à l'aide d'une table vibrante et la pression d'une charge placée directement à la surface du BCR. De cette manière, le béton est confiné dans toutes les directions et sa ségrégation est donc limitée. Dans cette étude, la fréquence a été fixée à 50 Hz. Cette méthode de serrage permet la mise en œuvre de bétons très secs comme c'est le cas du BCR, car la vibration a été complétée par une compression de 6,5 kPa (Projet National BaCaRa, 1996).



Fig. III.15 : compactage automatique d'un BCR



Fig. III.16 : compactage avec table vibrante

Conclusion

Les résultats des essais présentés dans ce mémoire ont permis d'étudier l'utilisation de granulats de béton et de granulats dans la fabrication de bétons compactés au rouleau.

Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation de ces matériaux locaux, la maniabilité, la teneur en air, la masse volumique, la résistance à la compression et la résistance à la traction des BCR ont été mesurées en laboratoire. afin d'évaluer leur durabilité. Finalement, l'utilisation des granulats de béton dans les BCR en matière économique et environnementale.

Chapitre IV :
Formulation du BCR

Introduction

Il n'existe jusqu'à ce jour aucune méthode standard reconnue pour la formulation des BCR. Depuis plusieurs années, différentes méthodes ont été utilisées avec succès dans le monde entier pour la formulation de BCR pour barrage et de BCR pour pavage. La plupart de ces méthodes demeurent toutefois essentiellement empiriques et requièrent la réalisation de plusieurs gâchées d'essais pour obtenir les proportions optimales du mélange [Marchand et al. 1997].

La formulation d'un BCR doit généralement se conformer à certains critères de performance. La teneur en liant doit être optimale afin d'atteindre les propriétés mécaniques spécifiées à un coût minimal et le rapport eau/liant du mélange doit être ajusté de manière à obtenir une maniabilité permettant d'atteindre une densité en place optimale avec le rouleau compacteur. La teneur en eau ne doit pas être trop élevée pour éviter que le passage du rouleau compacteur ne crée des ondulations dans le béton frais, mais assez élevée pour éviter la ségrégation du mélange. La teneur en eau optimale dépend des granulats (forme, absorption, granulométrie) et du type et de la quantité de liant utilisé. Les proportions entre les différentes classes granulaires doivent être fixées de façon à atteindre la densité requise et à produire une surface fermée. En résumé, la formulation d'un mélange de BCR doit permettre l'obtention d'un béton le plus dense possible, pour une maniabilité optimale [Marchand et al. 1997].

Les méthodes de formulation des BCR peuvent être classées en trois catégories distinctes : méthode empirique, méthode semi-empirique et méthode théorique.[12]

IV.1 Principes généraux :

L'étude de la formulation du BCR consiste à définir les proportions masse volumiques optimales des mélanges des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, pour pouvoir réaliser un béton dont les propriétés soient celles recherchées pour la construction routière.

Peu importe la méthode de formulation utilisée, un mélange de BCR doit généralement se conformer à certaines exigences, parmi lesquelles, on peut citer

- la teneur en liant doit être optimale afin d'atteindre les propriétés mécaniques spécifiées à un coût minimum;
- le rapport E/C du mélange doit aussi être ajusté de manière à permettre une maniabilité optimale menant à l'obtention d'une densité in situ optimale avec le rouleau compacteur
- teneur en eau (l'eau de gâchage)
- qualité et dosages des granulats (analyse granulométrie)

➤ la teneur en eau du mélange doit être maintenue juste en dessous d'une certaine valeur à laquelle le passage du rouleau provoque des ondulations du béton à l'état frais, et juste au-dessus d'un seuil où une consistance plus sèche du mélange produirait un accroissement de la ségrégation

➤ les proportions entre les différentes classes granulaires doivent être fixées de sorte à atteindre la densité requise et à produire une surface fermée.

IV.2 CHOIX DE LA METHODE DE FORMULATION SEMI-EMPIRIQUE :

La méthode de formulation adoptée est la méthode de Fuller Thompson, Elle consiste à déterminer les proportions des différentes classes granulaires en vue de créer un squelette granulaire avec le minimum de vide après serrage.

On tente avec les courbes de références de type Talbot-Fuller-Thompson (T-F-T) à obtenir une compacité maximale [3,11]. La courbe proposée a pour équation générale

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n * 100 \dots \text{IV.1}$$

Où D est le diamètre maximal pris dans notre cas égal à 20 mm, d est la grosseur des tamis (mm), p est le pourcentage passant (%) des particules selon le tamis de grosseur d et n est un paramètre variable et compris entre 0,25 et 0,45 [14].

Les courbes tracées représentent une approximation de la courbe granulométrique idéale. Sur (la fig. IV.1), nous avons déterminé $n=0,45$ qui correspond à la courbe retenue appartenant au fuseau granulométrique du béton compacté au rouleau (BCR) (Venant et papadakis) [14].

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^{0.45} * 100 \dots \text{IV.2}$$

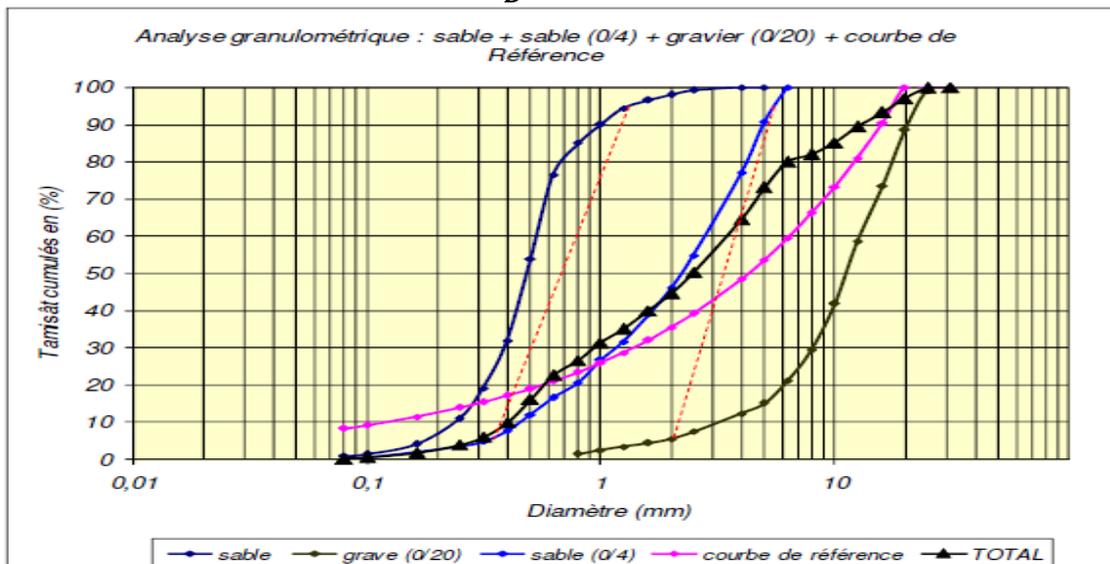


Figure IV.1 : courbe de référence T-F-T Pour n = [0.25, 0.45] avec de fuseau de

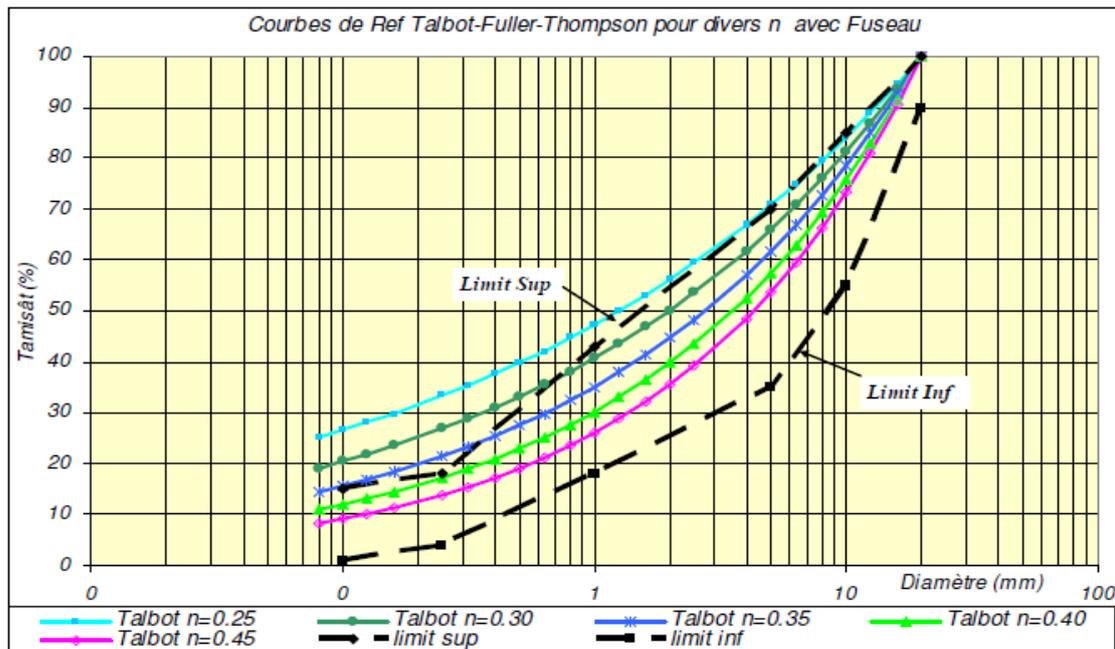


Figure IV.2 : Exemple de courbe granulométrique de référence T-F-T pour n = 0.45

IV. 3 Liant

Le choix du type de liant et de son dosage est fonction des résistances mécaniques requises et des critères de durabilité exigés. De manière générale, les mélanges de BCR sont formulés avec des teneurs variant entre 250 à 350 kg/m³. La teneur en liant a de grandes influences sur les propriétés des bétons compactés au rouleau. Effectivement, lorsque la teneur en liant augmente, cela permet de réduire la friction entre les granulats et donc améliorer la maniabilité. Cependant, une teneur en ciment trop élevée peut induire des fissures de retrait plus rapprochées en plus d'augmenter significativement les coûts de production sans nécessairement augmenter les résistances mécaniques et prolonger la durée de vie du revêtement [Gauthier & Marchand, 2002].

-Le dosage classique d'un mélange de BCR est de 250 à 350 kg/m³, soit une teneur en liant de 10 à 15 % de la masse totale des constituants secs.

Le ciment gris Chamil 32,5 de Lafarge est un ciment Portland destiné aux travaux courants : préparation de béton, mortier ou coulis. Il dispose d'une résistance mécanique à 28 jours de ≥ 32.5 MPa. Polyvalent, il est utilisé pour la réalisation de Travaux de réseaux et de voirie,

- Pavages,
- Maçonnerie de mur.

Un BCR correctement formulé avec une teneur en liant de 300 kg /m³ et un rapport de E/C de 0.35 développe une résistance en flexion de 4 à 5.3 MPa à 7 jours et 7 MPa à 28 jours de mûrissement [8].

IV.4 l'eau:

La plage de variation de la teneur en eau (pourcentage de la masse de l'eau contenu dans un mélange par rapport à la masse totale des solides secs) est comprise entre 4,5% et 6% [3,6]. Ce dosage en eau considéré relativement faible par rapport au permet d'obtenir un béton sec à affaissement nul.

Le BCR à l'état frais est traité comme un sol humide, et sa teneur en béton conventionnel l'eau optimale est déterminée par la même méthode Proctor modifiée utilisée pour les sols. Pour notre cas, nous avons pris un rapport E/C fixe et ceci en tenant compte de l'humidité des granulats. et dans la partie expérimentale de notre travail, la qualité d'eau utilisée est une eau potable.

$E/C = 0.35$ donc l'eau $\rightarrow 105L$

IV.4.1 Évaluation de la quantité de ciment C et de la quantité d'eau E

La quantité de ciment nécessaire en fonction du rapport C/E l'ouvrabilité désirée, qui peut être identifiée à partir de l'affaissement au cône (voir « Annexe : Essai au cône ») à l'aide du tableau 4. La norme NF-EN-206/CN.

Plasticité	Serrage	Affaissement (cm)	Dénomination NF-EN 206/CN
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1 / S2
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	S2
Béton mou	Piquage	10 à 13	S3
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14	S3 / S4 / S5

Tableau IV.1: Évaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône [22]

IV.5 Les adjuvants

Les adjuvants sont utilisés dans le but de faciliter la mise en œuvre des BCR, d'adapter Leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, de réduire les coûts de mise en œuvre, d'améliorer les propriétés du BCR durci voire même de lui conférer des propriétés nouvelles

IV.6 les adjuvants réducteurs d'eau :

Ils ont pour rôle, à consistance égale de réduire le dosage en eau et à dosage en eau constant d'augmenter l'affaissement au cône d'Abram. Ces adjuvants sont couramment employés dans la réalisation des BCR puisque permettant une amélioration de l'homogénéité de la pâte.

Ce projet nous avons utilisé l'adjuvant (**plastifiant réducteur d'eau**) type GLENIUME 24 Leur dosage moyen est de 0,3 à 0,5 % du poids du ciment. Norme NF P 18-335 de Décembre 1986

IV.7 Calcul du volume des vides :

Mesure du volume des vides (L/m³) du squelette granulaire compacté

Généralement la valeur de V_{vc} se situe entre 180 et 200 L/m³

Compactage à l'aide de l'appareil Vebe, ou à partir de la masse volumique pilonnée à sec du mélange granulaire complet ou, à l'aide d'un compacteur à cisaillement giratoire.

En l'absence de donnée, on peut amorcer le processus en supposant une valeur typique de 190L/m³

La plage optimale de la maniabilité pour un mélange de BCR est de 40 à 90 secondes de L'appareil Vebe. Pour nous mettre dans le cas le plus défavorable, on prend la valeur de 40 Secondes (en effet, plus le béton est consistant, plus le temps Vebe est grand).

Ainsi, pour cette valeur de la maniabilité, la courbe de la (figure IV.3)

donne un rapport V_p/V_{vc} égal à 1,05.

$$\frac{V_p}{V_{vc}} = 1,05 \Rightarrow V_p = V_{vc} * 1,05 = 190 * 1,05 = 199,50 \text{ L/m}^3$$

IV.7.1 Choix de volume de pate :

- La maniabilité d'un BCR est fonction du rapport V_p/V_{vc}
- V_p : le volume de pate (eau + ciment + ajout) dans 1m³de BCR (L/m³)
- V_{vc} : le volume des vides dans 1m³de squelette granulaire compacté (L/m³)

On détermine le volume de pate (1/m³) requise pour une maniabilité désiré

Généralement, le rapport (V_p / V_{vc}) compris 1.0 et 1.05 permet d'atteindre

Une maniabilité variant de 40 à 90 seconde mesuré [18]

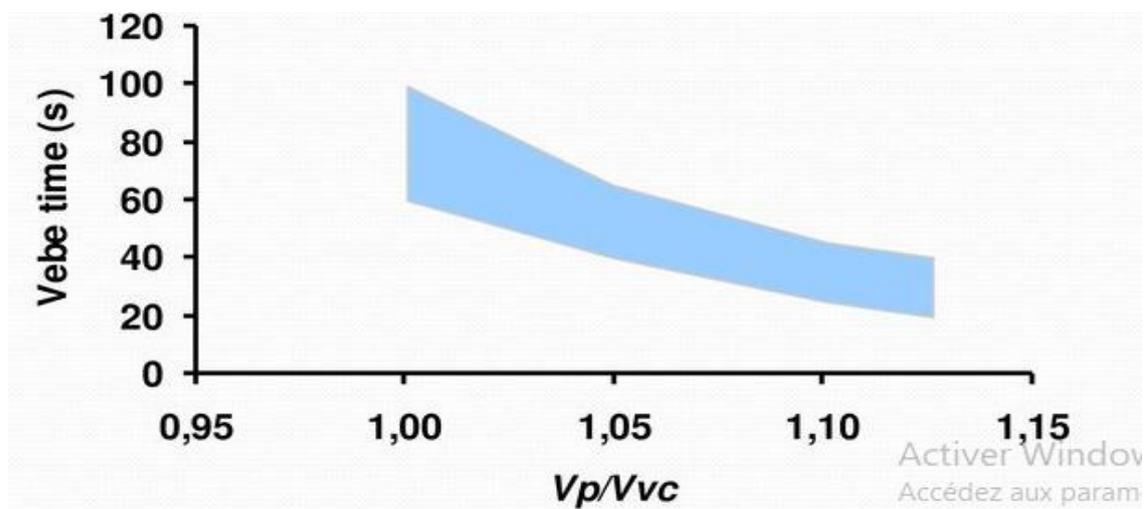


Figure IV.3 : Relation expérimentale entre la maniabilité et le rapport V_p/V_{vc}

IV.8 Calcule des proportions :

Mélanges	Poids spécifique y	Poids kg	Volumes
Ciment IIA 32,5 Lafarge Sig cpj	3.11	300	96.46 lt
Eau	$\frac{E}{C} = 0.35$	105.0	105 lt
Plastifiant 1 Gleniume 24	1.05	3.00	2.86 lt
Vide 1.05			15 lt
total			219.32 lt
Volume gravier	1000 - 219.32 =		780.68 lt

Tableau IV.2 : résultat des volumes de mélange [19]

$$V_{pate} = V_{ciment} + V_{eau}$$

$$V_{pate} = \frac{Mc}{dc} + Mc \frac{E}{C} \rightarrow Mc = \frac{Vp}{\frac{E}{C} + \frac{1}{dc}}$$

$$M_{eau} = V_{eau} * d_{eau}$$

Or. La densité de l'eau est $d_{eau} = 1$, alors, on aura

$$M_{eau} = V_{eau} * d_{eau} = V_{eau} = Mc \frac{E}{C}$$

Avec : **Vp** : volume de pâte en ($1/m^3$)

dc : poids spécifique du ciment

Mc : masse du ciment en (Kg/m^3)

Me : masse de l'eau en (Kg/m^3)

IV.8.1 Détermination du pourcentage de sable 0/1 :

On trace la ligne joignant le point à 5% de la courbe granulométrique du sable 0/3 au point à 95% de la courbe granulométrique du sable d'une L'intersection de cette droite avec la courbe de Fuller-Thompson donne le pourcentage de sable à utiliser.

IV.8.2 Détermination du pourcentage de sable 0/3

L'intersection de la ligne joignant le point à 5% de la courbe granulométrique du gravier 3/8 au point à 95% de la courbe granulométrique du sable 0/3 avec la courbe de Fuller Thompson donne un certain pourcentage X. et le pourcentage de gravier 3/8 à utiliser sera de (X - % sable).

IV.8.3 Détermination du pourcentage de gravier 3/8

L'intersection de la ligne joignant le point à 5% de la courbe granulométrique du gravier 8/15 au point à 95% de la courbe granulométrique du gravier 3/8 avec la courbe de Fuller Thompson donne un certain pourcentage X.

Et le pourcentage de gravier 3/8 à utiliser sera de (X - % sable 0/3).

IV.8.4 Détermination du pourcentage de gravier 8/15

Le pourcentage de gravier 8/15 nécessaire sera de (100 % - X).

TAMIS	0/4 mm		3/8 mm		8/16 mm		Sable corr		100		COURBES	
	%	24	%	31	%	20	%	25	Fuller	MIX		
40	100	Zone de graphique		31,0	100,0	20,0	100	25,0	40	100,0	100,0	
31,5	100,0	24,0	100,0	31,0	100,0	20,0	100	25,0	31,5	100,0	100,0	
25	100,0	24,0	100,0	31,0	100,0	20,0	100	25,0	25	100,0	100,0	
20	100,0	24,0	100,0	31,0	100,0	20,0	100	25,0	20	100,0	100,0	
16	100,0	24,0	100,0	31,0	94,0	18,8	100	25,0	16	100,0	98,8	
12,5	100,0	24,0	100,0	31,0	61	12,3	100	25,0	12,5	91,3	92,3	
10	100,0	24,0	100	31,0	19	3,8	100	25,0	10	81,6	83,8	
8	100,0	24,0	98	30,3	11	2,2	100	25,0	8	73,0	81,5	
6,3	100,0	24,0	75	23,3	6	1,1	100	25,0	6,3	64,8	73,5	
4	92	22,0	20	6,1	2	0,4	100	25,0	4	51,6	53,6	
2	56	13,4	5	1,5	1	0,1	99	24,7	2	36,5	39,8	
1	30	7,1	2	0,7	1	0,1	96	24,0	1	25,8	32,0	
0,5	15	3,7	1	0,4	1	0,1	76	18,9	0,5	18,3	23,1	
0,25	8	1,9	1	0,4	1	0,1	36	9,0	0,25	12,9	11,5	
0,125	4	1,0	1	0,4	1	0,1	3	0,8	0,125	9,1	2,4	
0,063	3	0,7	1	0,3	1	0,2	3	0,7	0,063	6,5	1,8	

Tableau IV.3 pourcentages des agrégats avec courbe de référence T-F-T

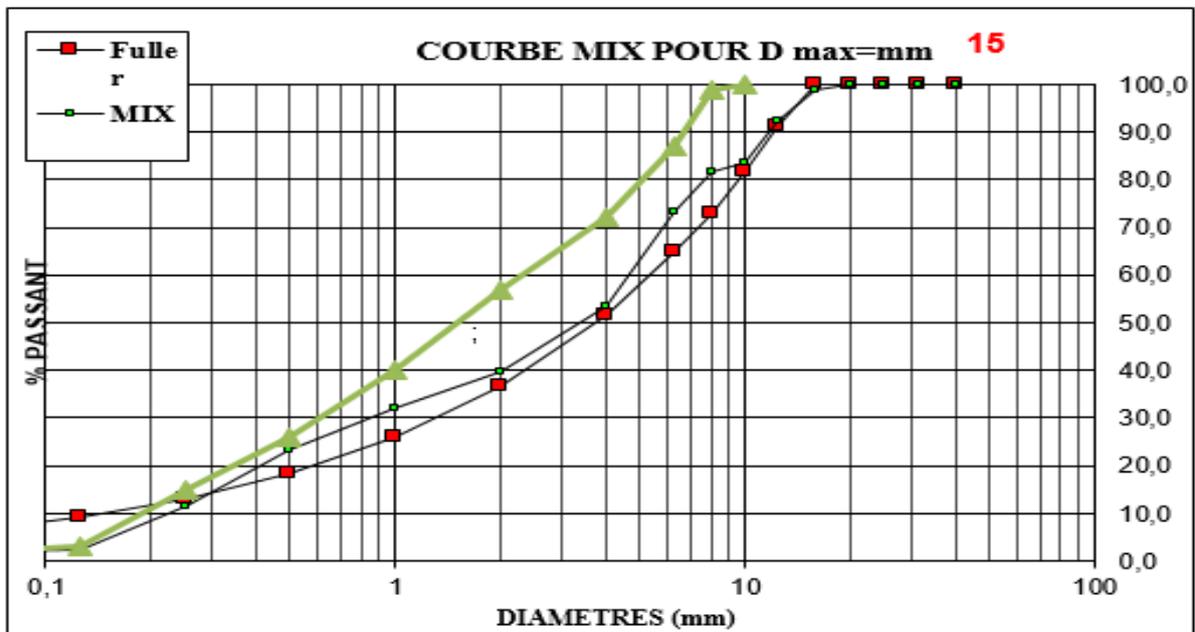


Fig. IV.4. Détermination de la granulométrie optimale avec la courbe de Référence de T-F-T

IV.8.5 Les proportions massiques retenues et le l'humidité sont regrouper sur le tableau

Graviers	Proportion %	Masse vol. réelle	Absorption Abs %	Humidité W%	correction quantité d'eau $W_{cr} = Abs - W$
0 - 3 mm	24	2,66	2,80	0	2.80
Sable 0/1	25	2,65	1,76	0	1.76
3/8	31	2,59	0,55	0	0.55
8/15	20	2,66	0,61	0	0.61

Tableau IV.4 : les proportions massiques des agrégats et l'humidité

IV.8.6 Résultat de composition granulair du BCR

Graviers	Poids %	Volume	Poids sec	Poids effective	Correction d'eau $W_c = ps \times w_{cr} \%$
0 - 3 mm	24	187.36 L	498.39 kg	498.4 kg	13.95
Sable 0/1	25	195.17 L	517.20 kg	517.20 kg	9.20
3/8	31	242.01 L	626.81 kg	626.80 kg	3.45
8/15	20	156.14 L	415.32 kg	415.30kg	2.53
Total	100	780.68 L	2057.72 Kg	2057.72 Kg	29.04

Tableau IV.5 : composition granulair du béton d'un BCR

IV.8.7 Composition du BCR sur le tableau suivant :

Composition mélange		Dosage pour 1 m ³
Ciment cpj 32.5 sig	Ciment	300 kg
Eau	Eau	134 Lt
Plastifiant	Gleniume 24	3.00 Lt
24	0/3	498.4 kg
25	0/1	517.20 kg
31	3/8	626.8kg
20	8/15	415.3 kg
100	Totale	2494.8

Tableau IV.6 : composition du BCR [19]

Note : $\frac{G}{S} = 1.05$

IV.9 Caractérisation du BCR par l'essai Proctor modifié :

Sur le chantier avant la pose le matériau de revêtement BCR, nous effectuons

Une opération d'essai Proctor modifié. - On a choisi le moule CBR

(California Bearing Ratio Test) de 15,2 cm de diamètre intérieur et de 15,2 cm de hauteur.

Ce moule convient pour le cas des diamètres des grains ne dépassant pas 20 mm

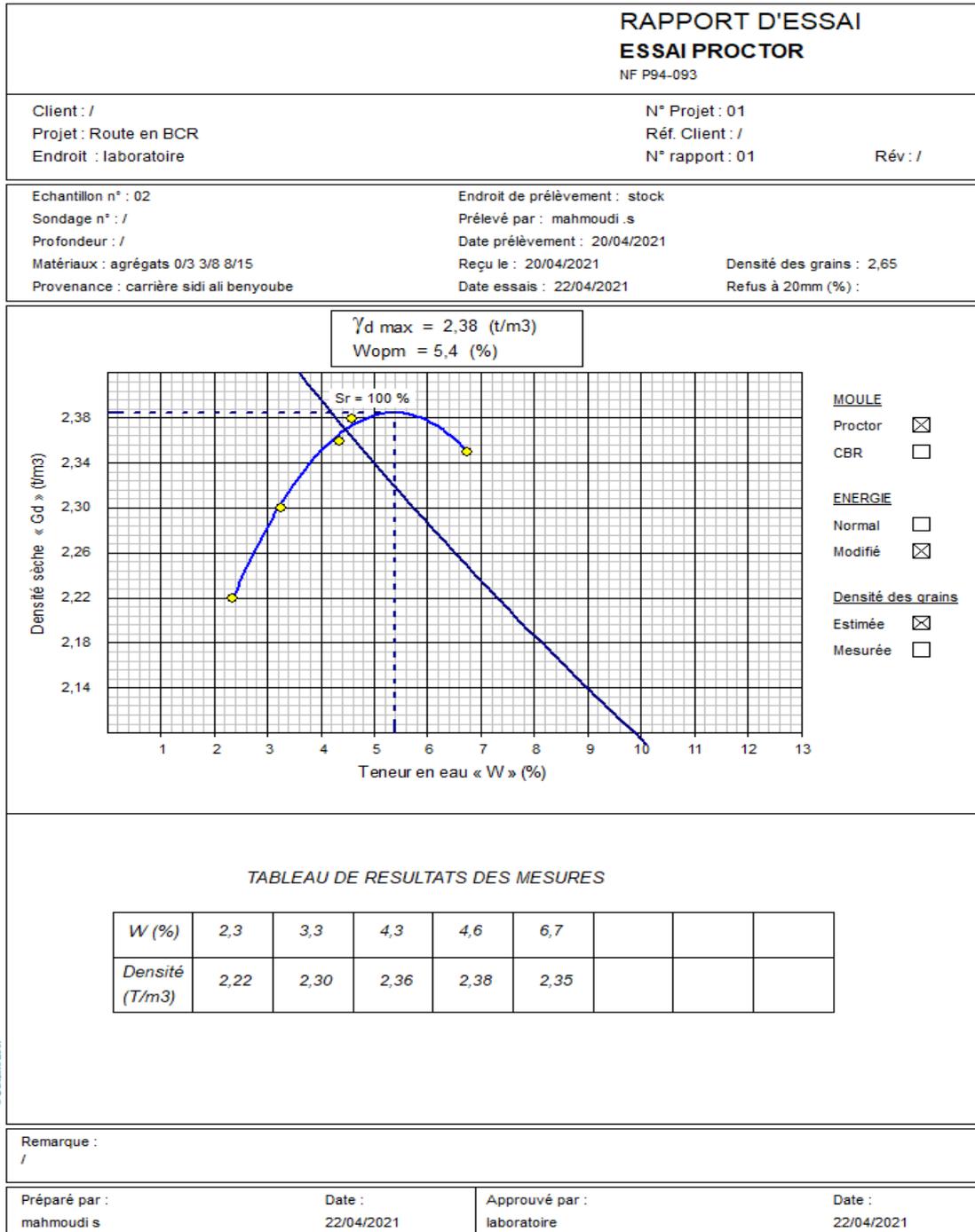


Figure IV.5 Courbe de la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau

IV.9.1 courbe Proctor Modifié [20]

Le nombre de coups par couche dans l'éprouvette considérée est alors N = 55 coups

La durée de l'essai, depuis le malaxage, jusqu'à la confection des éprouvettes ne devra pas

Dépasser 20 minutes afin d'éviter la prise du ciment. Le démoulage se fera 24 heures après la confection des éprouvettes. a partir de ce moment, Elles seront gardées dans un bassin d'eau pour assurer leur bon murissement

Résultat conclusion sur l'essai ?

IV.10 Les essais d'écrasement (traction et compression) à 28 jours :

IV.10.1 Résistance en compression

Elle se calcule par la formule suivante :

$$\mathbf{R_{cj}} = \frac{p}{\frac{\pi D^2}{4}} \dots\dots(\text{équa})\dots\mathbf{IV.3}$$

Avec :

R_{cj} : résistance en compression

P : charge maximale produisant la rupture en compression

$\frac{\pi D^2}{4}$: Section de l'éprouvette

j : âge du béton (en jours) au moment de l'essai (j =28 jours dans notre cas).

IV.10.2 Résistance en traction

Essai de traction par fendage

Cependant, dans notre cas, pour des raisons de disponibilité du matériel, nous ferons l'essai de traction par fendage, plus connu sous le nom d' « Essai Brésilien ».

La résistance en traction se calcule par la formule

$$\mathbf{R_{tj}} = 2 \frac{p}{\pi DL}$$

Avec :

R_t : résistance en tracti

P : charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en Traction du diamètre vertical ;

πDL : section latérale du cylindre de diamètre D et de longueur L.

j : âge du béton (en jours) au moment de l'essai (j = 28 jours dans notre cas).

IV.10.3 Confection des éprouvettes

Les mélanges seront confectionnés dans des éprouvettes de diamètre D =16 cm et de hauteur H = 32 cm.

Le volume d'une éprouvette est alors : $v = \frac{\pi D^2}{4} H = 6430.72 \text{ cm}^3$

IV.10.4 Résultats de résistance à la compression selon à la norme (EN 12390-4)

Tableau IV.7 : résultats de la Résistance à compression (BCR)

N°EP	Poids kg	Charge KN	R.C MPa	Age
1	15.420	666.78	33.18	28
2	15.460	716.22	35.64	
3	15.400	614.13	30.56	
Moyenne			33.12	

IV.10.4.1 Résultats de traction par fendage selon la norme (EN13390-6)

Tableau IV.8 : résultats de traction par fendage de (BCR)

N°EP	Poids kg	Charge KN	R.T MPa	Age
1	15.380	317.81	4.00	28
2	15.415	321.84	3.95	
3	15.390	296.89	3.69	
Moyenne			3.88	

IV.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons formulé un BCR avec un dosage en ciment de 300 kg/m^3 et un rapport E/C = 0.35, soit, un béton ferme et affaissement nul.

La résistance en compression moyenne à 28 jours qui est de 33.12 MPa est un peu inférieure à celle qui était visée lors de la formulation. Cette différence était prévisible dans la mesure où la courbe donnant la résistance à la compression en fonction du rapport E/C est établie pour des mélanges de BCR avec ajout cimentaire.

La résistance en traction obtenue à partir de l'essai brésilien sur un ensemble d'éprouvettes donne une résistance moyenne de 3.88 MPa. Cette valeur est jugée bonne pour une dalle destinée au revêtement de chaussée où les sollicitations en traction sont importantes

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont permis d'étudier la formulation du béton pour une chaussée rigide. Le BCR est un matériau facile à utiliser pour la construction et l'entretien des chaussées, de plus il est économique (faible dosage en ciment) et non polluant que l'asphalte.

L'utilisation des granulats de béton dans la fabrication de (BCR) bétons compactés au rouleau, et en utilisant des matériaux de gisements locaux,

Pour valider notre formulation de BCR, la maniabilité, la teneur en air, la masse volumique, la résistance à la compression et la résistance à la traction des BCR ont été mesurées en laboratoire.

Les essais expérimentaux réalisés dans le cadre de ce projet de recherche ont permis à tirer les conclusions suivantes :

* Les résultats expérimentaux ont démontré que le choix d'une distribution granulométrique optimale permet de diminuer très significativement le volume des vides d'un mélange granulaire et par conséquent de minimiser le volume de pâte nécessaire pour produire un BCR pour revêtement routier,

* la composition de BCR est optimale et présente des propriétés acceptables à l'état frais et durci respectivement pour le mélange de béton dosé à 300 kg/m³ en ciment de Lafarge (CEM II/A 32.5) et en utilisant le gravier de carrière de Sidi Ali Ben Yoube Wilaya De Sidi Bel Abbes, et le sable 0/1 de sablière Redjeme Demouche

* la résistance en compression a été déterminée à partir d'éprouvettes confectionnées au laboratoire; le résultat fut concluant: 33.12 MPa en moyenne. au bout de 28 jours de mûrissement et une résistance à la traction de 3.88 MPa.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : RABAH AICHA CHEF DE BUREAU HISTOIRE DE LA ROUTE EN ALGERIE 2016 de Chargement en béton compacté au rouleau.
- [2] : T 50 VOIRIES ET AMÉNAGEMENTS URBAINS EN BÉTON chaussée rigide
- [3] : directive pour la réalisation des chaussées en béton Ministère des transports-Mai 1978 Chaussées en béton Numéros spéciaux du bulletin de liaison du laboratoire des ponts Et Chaussées -1987et 1990
- [4] : Transports Québec (1995) Guide pour évaluer la performance des chaussées, Québec, Canada.
- [5] : TESSIER, G.R., (1990). GUIDE de construction et d'entretien des chaussées. Montréal Association québécoise du transport et des routes« AQTR »
- [6] : LAFARGE CIMENTERIE M'SILA L'EXPERIENCE ALGERIENNE pour les route en BCR Projet > Route d'accès à l'usine LCM [Hammam Dalaa, M'SILA]
- [7] : SITE INTERNET, [https:// MEDIATHEQUE.SNBPE.ORG](https://MEDIATHEQUE.SNBPE.ORG), le projet routier : Un enchainement de choix.
- [8] : GAUTHIER P. ET MARCHAND J., (2004), Conception et réalisation de revêtements en béton Compacté au rouleau au Québec, Association Béton de Québec (ABQ) Québec, Canada, Pagination multiple.
- [9] : A.AIADE, MODELES DE CHAUSSEE ROUTIERE 2017
- [10] : LIVRE DE BETON GEORGE DREUX NOUVEAU GUIDE DE BETON
- [11] : FICHE TECHNIQUE CIMENT LAFARGE 32.5 N
- [12] : OTSAMA MBA JEAN PAUL. Contribution à l'étude de l'influence des matériaux fins sur les propriétés rhéologique et mécanique du béton compacté au rouleau pour barrages. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées : Génie civil. SHERBROOKE (Québec), Canada : Université De sherbrooke ,1997 .
- [13] : SERGE LEPAGE UNIVERSITE DE SHERBROOKE ETUDE D'UN NOUVEAU PROCÉDE DE PRODUCTION DE BETON COMPACTE AU ROULEAU
- [14] : BOUGUERRA Walid Harrington, D. et al. 2010. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Technical report, National concrete Pavement Technology Center. Institute for Transportation, Iowa State University

- [15] : MUSTAPHA ZDIRI, ETUDE DE FORMULATION et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux Octobre 2008.
- [16] : ABOUBAKRY SALL, CONCEPTION, FORMULATION ET MISE EN OEUVRE D'UN BETON 2007 COMPACTE AU ROULEAU
- [17] : XAVIER JOURDAIN, FORMULATION D'UN BETON ORDINAIRE 2018
- [18] : RICHARD GAGNE, METHODES DE FORMULATION et d'optimisation des mélanges de BCR, 2001
- [19] : LOGICIEL FULLER TOMPSON, analyse granulométrique et proportion des agrégats
- [20] : LOGICIEL DATA SOL TESTE GEOTECHNIQUE 2009
- [21] : SITE INTERNET, [https:// MEDIATHEQUE.SNBPE.ORG](https://MEDIATHEQUE.SNBPE.ORG), le projet routier :
Un enchainement de choix.
- [22] : ABDELGHAFOUR SAADI, FORMULATION ET ETUDE D'UN BETON DE ROUTE A BASE DE MATERIAUX LOCAUX Octobre 2010.
- [23]: BOUGUERRA Walid, Etude du comportement d'un béton compacté au Rouleau (BCR) à base des granulats recyclés 2017/2018.
- [24]: S. BASTIEN, VALORISATION DES GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉ ET DES granulats de verre recyclé dans les pavages industriels en béton compacté au rouleau avril 2016.
- [25] : FICHE TECHNIQUE ADJUVANT GLENIUM 24

ANNEXE

Liste des normes

NF-EN-206/CN : l'affaissement au cône

NF EN 933-1: Analyse granulométrique

NF P 18-598 : Equivalent de sable selon la norme

NA 1984 : Essai au bleu de méthylène

NF EN 1097-6 : Masse volumique réelle, masse volumique apparente et coefficient

D'absorption d'eau

NF EN 933-3 : Coefficient d'aplatissement

NF P 18-573 : essai los Angeles

NA 442-2013 : performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques de ciment

NF EN 13139 : Module de finesse

NF P 49 093 : Proctor modifié

NFP18-406 : La résistance à la compression

NF.P 18 408 : La résistance à la traction par fendage

Fiche technique d'adjuvant



GLENIUM[®] 24

Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et très long maintien d'ouvrabilité.

Description

Le GLENIUM[®] 24 est un adjuvant non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et longue ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du GLENIUM[®]

Le GLENIUM[®] se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du GLENIUM[®] dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive.

L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires.

Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Domaines d'application

Le GLENIUM[®] 24 est particulièrement recommandé pour la fabrication de bétons à faible E/C, à très long maintien d'ouvrabilité et aux performances élevées à jeune âge. Le GLENIUM[®] 24 est donc adapté à l'industrie du béton prêt-à-l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Propriétés

L'excellent effet de dispersion du GLENIUM[®] 24 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 2 heures avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise. Le GLENIUM[®] 24 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton:

Augmente

- La résistance à la compression à jeune âge et à long terme.
- La résistance à la flexion à jeune âge et à long terme.
- Le module d'élasticité.
- L'adhérence sur les aciers.
- La résistance à la carbonatation.
- L'imperméabilité.
- La résistance aux agressions atmosphériques.
- La qualité des parements et de la texture du béton.

Diminue

- La vibration
- Le retrait
- Le risque de fissuration
- Le fluage.

Caractéristiques

Aspect	liquide
Couleur	brun
Masse volumique	1,05 ± 0,02 g/cm ³
pH	7,0 ± 1
Teneur en chlorures	< 0,1%
Extrait sec	22 ± 2 %
Na ₂ O eq	< 2 %
Transport	non classé
Étiquetage	Pas de symbole exigé



The Chemical Company

GLENIUM[®] 24

Mode d'emploi

Le GLENIUM[®] 24 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du GLENIUM[®] 24 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois il est possible d'incorporer le GLENIUM[®] 24 dans l'eau de gâchage.

Eviter d'ajouter le GLENIUM[®] 24 sur les granulats.

Recommandations

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement.

Compatibilité

Le GLENIUM[®] 24 est compatible avec la majorité des ciments.

Le GLENIUM[®] 24 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consultez votre représentant local BASF CC pour toute synergie.

Il est utilisé en synergie avec :

- Micro-Air[®] 111.
- Pozzolith[®] 555
- Glenium[®] Activator
- Meyco[®] MS 610, Rheomac[®] SF 920
- Glenium[®] Stream, Rheomac[®] 885F
- Meyco[®] SA 160, 162, 167

Dosage

Plage normale d'utilisation:

0,3 à 2,0 % du poids du ciment, soit 0,28 à 1,90 litres pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC.

Conditionnement

Container de 1000 L, fût de 208 L, Bidon de 25 L ou vrac.

Stockage

Stocker le GLENIUM[®] 24 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

Précautions d'emploi

Le GLENIUM[®] 24 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

Rapport de Qualité

Tous les produits élaborés par BASF ou importés par les sociétés filiales de BASF à travers le monde, sont certifiés conformes aux exigences des systèmes de gestion de qualité et d'environnement ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001.

09/09 BASF_CC-ALGERIA

* Les propriétés énumérées sont seulement à titre de conseils.

Sarl BASF Construction Chemicals
Algeria.

Phone: +213 (0) 21.30.95.09 / 12
Fax: +213 (0) 21.30.95.19 / 12
Zone d'Activité de Baba Ali -Saoula-
Alger, ALGERIE.

BASF - The Chemical Company
www.basf-cc.com

Comme toutes les fiches techniques de BASF-CC sont mises à jour de façon régulière, il est de la responsabilité de l'utilisateur d'obtenir la version la plus récente.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci. L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec votre représentant BASF Construction Chemicals.

Fiche technique de ciment

FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT CM. v04

CHAMIL est un ciment gris, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO²) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al²O³) et le fer (Fe²O³). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

CHAMIL présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformant à la norme NA 442 et la norme EN 197-1.

Domaine d'utilisation :

CHAMIL est utilisé pour tous les travaux courants qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau et qui n'exigent pas de hautes résistances mécaniques.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Béton structurel
- Fabrication des éléments préfabriqués (parpaings, buses, caniveaux,...ect)
- Fabrication des carreaux de dalle
- Travaux de finition.

CHAMIL

CPJ-CEM-I/IB 32,5 R NA 442



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaia, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.29
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel: +213 (0) 21 48 16 65
Fax: +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 07, 28360, Mascara
Tel. / Fax: +213 (0) 45 04 88 98

LAFARGE
لافارج

CHAMIL

CPJ-CEM-II/B 32,5 R NA 442



FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT CM. v04

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	11.0–15.20
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	1.9–2.8
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1.7–2.4
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0.01–0.04

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	55.0 - 64.0
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6.0 - 8.2

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	26.8– 31.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4500–5500
Retrait à 28 jours en µm/m:	<1 000
Expansion en mm:	0,5 – 2.5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min):	120 - 200
Fin de prise (min):	200- 300

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 32.5 & ≤ 52.5

Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaï, M'sila (ACC)
Tel: +213 35 50 78 20
Fax: +213 35 55 70 00

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax: +213 (0) 21 48 19 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggezz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tel. / Fax: +213 (0) 46 64 08 06

LAFARGE
لافارج